Énergie, Mines et Ressources Canada
Energy, Mines and Resources Canada

Nº 86-6F

RAPPORT DE CANMET

CARACTÉRISATION DES CENDRES VOLANTES CANADIENNES ET LEUR PERFORMANCE RELATIVE DANS LE BÉTON

G.G. CARETTE ET V.M. MALHOTRA

CANMET
Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie

Canada Centre for Mineral and Energy Technology

Canada

88-04564/

CARACTÉRISATION DES CENDRES VOLANTES CANADIENNES ET LEUR PERFORMANCE RELATIVE DANS LE BÉTON

5/p

G.G. CARETTE et V.M. MALHOTRA

Laboratoire de traitement des minéraux

LABORATOIRES DES SCIENCES MINÉRALES
RAPPORT DE CANMET 86-6F

Février 1986

Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1988

En vente au Canada par l'entremise des

Librairies associées
et autres libraires

ou par la poste auprès du

Centre d'édition du gouvernement du Canada
Approvisionnements et Services Canada
Ottawa (Canada) K1A 0S9

N° de catalogue M38-13 / 86-6F
ISBN 0-660-92213-4

au Canada: $5.00
à l'étranger: $6.00

Prix sujet à changement sans préavis

CARACTÉRISATION DES CENDRES VOLANTES CANADIENNES ET LEUR PERFORMANCE RELATIVE DANS LE BÉTON

G.G. Carette* et V.M. Malhotra**

RÉSUMÉ

Onze cendres volantes canadiennes ont été caractérisées et évaluées dans le but de déterminer leur performance relative dans le béton. La caractérisation comprenait la détermination de la composition minéralogique et chimique, des caractéristiques physiques et des propriétés pouzzolaniques. La performance relative de chacune des cendres volantes dans le béton a été évaluée en déterminant les propriétés du béton frais et durci, à savoir, l'affaissement, le contenu en air, le ressuage, le temps de prise, la résistance, le module d'élasticité, le retrait au séchage, le fluage et la résistance au gel et au dégel.

Les résultats démontrent la gamme étendue des propriétés chimiques, physiques et pouzzolaniques des cendres volantes sur lesquelles a porté la recherche. En dépit de ces résultats, toutes les cendres volantes étudiées se sont révélées propres à l'utilisation dans le béton. Les cendres volantes peuvent cependant affecter le béton frais et durci de diverses manières et on doit en tenir compte lors du dosage du béton dans lequel elles sont incorporées.

*Ingénieur des matériaux et **Chef, Section des matériaux de construction, Laboratoires des sciences minérales, CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada, Ottawa, Canada, K1A 0G1.

CHARACTERIZATION OF CANADIAN FLY ASHES AND THEIR RELATIVE PERFORMANCE IN CONCRETE

G.G. Carette* and V.M. Malhotra**

ABSTRACT

Eleven Canadian fly ashes were characterized and evaluated for their relative performance in concrete. Characterization included the determination of mineralogical composition, chemical composition, physical characteristics, and pozzolanic properties. The relative performance of each fly ash in concrete was evaluated through determination of the following properties of fresh and hardened concrete: slump, air content, bleeding, setting time, strength, modulus of elasticity, drying shrinkage, creep, and freezing-and-thawing resistance.

The results indicate a wide range of chemical, physical, and pozzolanic properties for the fly ashes investigated. In spite of this, all the fly ashes evaluated are shown to be suitable for use in concrete. They affect, however, the properties of fresh and hardened concrete in different ways, and this should be taken into account when proportioning concrete containing these fly ashes.

*Materials Engineer and **Head, Construction Materials Section, Mineral Sciences Laboratories, CANMET, Energy, Mines and Resources Canada, Ottawa, Canada, K1A 0G1.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ I
ABSTRACT III
INTRODUCTION 1
PORTÉE DE L'ÉTUDE 1
SOURCES DE CENDRES VOLANTES 1
CARACTÉRISATION DES CENDRES VOLANTES 1
Composition minéralogique 1
Composition chimique 1
Propriétés physiques 2
Densité 2
Finesse déterminée par tamisage humide sur un tamis de 45 µm 2
Finesse déterminée par tamisage à sec (Alpine Jet) sur un tamis de 45 µm 2
Surface spécifique Blaine 2
Distribution granulométrique 2
Propriétés pouzzolaniques 2
Activité pouzzolanique avec le ciment portland 2
Activité pouzzolanique avec la chaux 2
Exigences des spécifications 2
MÉLANGES DE BÉTON 2
Matériaux 2
Ciment 2
Granulats 2
Entraîneur d'air 3
Dosage des mélanges 3
Propriétés du béton frais 3
Confection et cure des éprouvettes 3
Essai des éprouvettes 3
Résultats des essais 4
DISCUSSION DES RÉSULTATS DES ESSAIS 4
Caractérisation 4
Composition minéralogique 4
Composition chimique 4
Propriétés physiques 5
Propriétés pouzzolaniques 5
Propriétés du béton frais 6
Affaissement 6
Dosage en entraîneur d'air 6
Temps de prise 6
Ressuage 6
Propriétés du béton durci 7
Résistance à la compression 7
Résistance à la flexion 7
Module d'élasticité de Young 7
Retrait au séchage 7
Fluage 8
Résistance au gel et au dégel 8
CONCLUSIONS 9
BIBLIOGRAPHIE 9
ANNEXE A - RÉSULTATS DÉTAILLÉS DES ESSAIS DE GEL ET DE DÉGEL 43

TABLEAUX

1. Composition minéralogique de certaines cendres volantes 13
2. Composition chimique des cendres volantes - Éléments principaux et secondaires 14
3. Composition chimique des cendres volantes - Éléments traces 15
4. Propriétés physiques des cendres volantes 16
5. Propriétés pouzzolaniques des cendres volantes 17
6. Conformité des cendres volantes canadiennes aux exigences des spécifications de l'ASTM et de l'ACNOR 18
7. Propriétés physiques et composition chimique du ciment 19
8. Dosage des mélanges de béton 20
9. Propriétés du béton frais 21
10. Programme d'essai du béton durci 22
11. Résumé des résultats d'essais relatifs à la résistance à la compression, à la résistance à la flexion et au module d'élasticité de Young 23
12. Résumé des résultats d'essais de retrait 24
13. Résumé des résultats d'essais de fluage 25
14. Facteurs de durabilité et paramètres du réseau de bulles d'air des mélanges de béton durci témoins et à cendres volantes 26
15. Résumé des résultats d'essais de gel et de dégel 27

A1. Variations de poids de prismes de référence conservés en atmosphère humide et de prismes d'essai soumis à des cycles de gel et de dégel 45
A2. Variations de longueur de prismes de référence conservés en atmosphère humide et de prismes d'essai soumis à des cycles de gel et de dégel 46
A3. Variations de vitesse d'impulsion ultrasonique de prismes de référence conservés en atmosphère humide et de prismes d'essai soumis à des cycles de gel et de dégel 47
A4. Variations de fréquence longitudinale fondamentale de prismes de référence conservés en atmosphère humide et de prismes d'essai soumis à des cycles de gel et de dégel 48

FIGURES

1. Emplacements des sources de cendres volantes 31
2. Diffractogrammes des cendres volantes bitumineuses 32
3. Diffractogrammes des cendres volantes subbitumineuses et de lignite 33
4a. Images obtenues par microscopie SEM de certaines cendres volantes 34
4b. Images obtenues par microscopie SEM à électrons secondaires de particules de cendres volantes 35
5. Étendue granulométrique des cendres volantes 36
6. Relation entre l'indice d'activité pouzzolanique de l'essai accéléré de 7 jours et celui de l'essai de 28 jours 37
7. Développement de la résistance à la compression avec l'âge 38
Développement de la résistance à la flexion avec l'âge 39
9. Retrait au séchage après une cure initiale de 7 jours dans l'eau 40
10. Retrait au séchage après une cure initiale de 91 jours dans l'eau 41
11. Fluage après une cure initiale de 91 jours en atmosphère humide 42

INTRODUCTION

Le CANMET a entrepris un projet de recherche sur l'utilisation de matériaux secondaires de cimentation dans le béton. Ces matériaux, qui sont des sous-produits des industries minières, métallurgiques et électriques, sont notamment la poussière de calcaire, les laitiers ferreux et non ferreux, les fumées de silice condensées et les cendres volantes. En plus de contribuer à donner des propriétés particulières au béton et à réduire la quantité de ciment requise, l'utilisation de ces matériaux dans le béton permet, dans une certaine mesure, de résoudre le problème de l'élimination des résidus solides. Un certain nombre de rapports de recherche ont été publiés sur le sujet (1-22).

Le présent rapport est le troisième d'une série de rapports consacrés à l'utilisation de cendres volantes canadiennes dans le béton. Le premier était une étude critique des propriétés chimiques, physiques et pouzzolaniques des cendres volantes (2); le deuxième visait à donner une évaluation critique des données publiées sur les effets de l'addition de cendres volantes influe sur le dosage des mélanges, les propriétés du béton frais de même que le comportement et la durabilité du béton durci (3). Le présent rapport, qui est le troisième et dernier de la série, porte sur la caractérisation des cendres volantes canadiennes et leur performance relative dans le béton.

PORTÉE DE L'ÉTUDE

La présente étude a porté sur onze cendres volantes. La caractérisation des cendres comprenait la détermination de la composition minéralogique, de la composition chimique, de la densité, de la finesse sur un tamis de 45 µm, de la surface spécifique à l'aide de l'appareil Blaine, de la distribution granulométrique et de l'activité pouzzolanique avec le ciment portland et avec la chaux.

On a évalué la performance relative de chaque cendre volante dans le béton en substituant de la cendre à 20 % du ciment, en masse. Deux mélanges de béton témoin et onze mélanges de béton contenant des cendres volantes ont été préparés, chacun en gâchées triples. Les caractéristiques du béton frais qu'on a déterminées étaient les suivantes : affaissement, teneur en air, ressuage et temps de prise. Pour les échantillons de béton durci, on a déterminé la résistance à la compression et la résistance à la flexion, le module d'élasticité, le retrait au séchage, le fluage et la résistance au gel et au dégel.

SOURCES DE CENDRES VOLANTES

La Figure 1 montre où se trouvent les sources des onze cendres volantes étudiées. Six cendres (n^{os} 1 à 6) sont dérivées du charbon bitumineux, trois (n^{os} 7, 8 et 9) proviennent du charbon subbitumineux et deux (n^{os} 10 et 11) proviennent de lignites. À tous les endroits où ces cendres sont recueillies, on utilise des récupérateurs électrostatiques, sauf dans un cas où on utilise des récupérateurs mécaniques. Lorsque possible, on a recueilli des échantillons d'étude représentatifs du matériau commercialisé pour fins d'utilisation dans le béton. Lorsque la cendre n'était pas commercialisée, on a effectué l'échantillonnage avec précaution à l'usine afin d'obtenir un échantillon représentatif.

CARACTÉRISATION DES CENDRES VOLANTES

COMPOSITION MINÉRALOGIQUE

On a étudié la composition minéralogique de huit des onze cendres volantes provenant des trois principaux types de sources; leurs diffractogrammes sont montrés aux Figures 2 et 3. On a aussi effectué, à l'aide d'une technique quantitative de diffraction des rayons X, un dosage des principales phases cristallines contenues dans ces cendres (23); au Tableau 1, on présente les résultats de même que les valeurs calculées de la teneur en verre. Les images micrographiques produites par microscopie SEM de quelques cendres volantes sont présentées aux Figures 4a) et 4b).

COMPOSITION CHIMIQUE

Les Tableaux 2 et 3 montrent la composition chimique de chaque cendre volante, en indiquant les constituants principaux et secondaires de même que les éléments traces. La plupart des constituants ont été dosés par spectrométrie en plasma d'argon à couplage inductif (ICAP).

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

DENSITÉ

On a déterminé la densité des cendres volantes en utilisant la méthode d'essai ASTM C 188 pour la masse volumique du ciment hydraulique. Les résultats sont présentés au Tableau 4.

FINESSE DÉTERMINÉE PAR TAMISAGE HUMIDE SUR UN TAMIS DE 45 µm

Le tamisage humide sur un tamis de 45 µm a été effectué conformément à la méthode C 430 de l'ASTM. Le pourcentage de refus pour chaque cendre volante après application du facteur de correction du tamis est montré au Tableau 4. Les pourcentages de refus non corrigés sont aussi donnés entre parenthèses, étant donné que le facteur de correction du tamis est basé sur un échantillon de ciment de référence et qu'il peut ne pas s'appliquer exactement à certaines cendres volantes. Le facteur de correction du tamis utilisé était de 16 % et, bien qu'il ait produit peu d'effet sur les cendres relativement fines, il a donné un accroissement appréciable du pourcentage de refus calculé dans le cas des cendres plus grossières.

FINESSE DÉTERMINÉE PAR TAMISAGE À SEC (ALPINE JET) SUR UN TAMIS DE 45 µm

On a effectué le tamisage à sec sur un tamis de 45 µm à l'aide d'une machine Alpine Jet en utilisant des méthodes établies précédemment au CANMET (24). Les résultats de ces essais, qui sont aussi montrés au Tableau 4, reflètent fidèlement les résultats obtenus par tamisage humide. Cependant, les résultats du tamisage à sec sont toujours inférieurs d'une quantité qui est essentiellement proportionnelle au pourcentage de refus.

SURFACE SPÉCIFIQUE BLAINE

Les résultats concernant la surface spécifique, déterminée à l'aide du perméamètre Blaine (ASTM C 204), sont donnés au Tableau 4.

DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE

On a utilisé trois appareils différents pour étudier la distribution granulométrique des cendres volantes : "sédigraphe" à rayons X, compteur de Coulter et analyseur granulométrique à laser. La Figure 5 montre l'étendue granulométrique obtenue pour les différentes cendres à l'aide de la méthode à laser. Des résultats détaillés d'essais de même qu'une évaluation comparative de chaque méthode sont donnés dans un autre document (25).

PROPRIÉTÉS POUZZOLANIQUES

ACTIVITÉ POUZZOLANIQUE AVEC LE CIMENT PORTLAND

On a déterminé la demande d'eau et l'activité pouzzolanique avec le ciment portland des cendres volantes en utilisant les méthodes d'essais normalisées ASTM C 311 et ACNOR A23-5. Les deux essais sont très similaires, sauf que dans l'essai de l'ASTM, la cure s'effectue à 38 °C pendant 28 jours tandis que l'essai de l'ACNOR est un essai accéléré dans lequel la cure est effectuée à 65 °C pendant 7 jours. Les résultats des essais d'activité, y compris les besoins en eau et l'indice d'activité, sont présentés au Tableau 5. La Figure 6 montre la relation entre les résultats de l'essai accéléré de 7 jours et ceux de l'essai de 28 jours.

ACTIVITÉ POUZZOLANIQUE AVEC LA CHAUX

Les indices d'activité pouzzolanique avec la chaux ont été déterminés conformément à la méthode ASTM C 311; les résultats sont aussi présentés au Tableau 5.

EXIGENCES DES SPÉCIFICATIONS

Les exigences chimiques et physiques des spécifications de l'ASTM et de l'ACNOR relatives aux cendres volantes sont montrées au Tableau 6 avec les valeurs correspondantes obtenues pour chaque cendre volante.

MÉLANGES DE BÉTON

MATÉRIAUX

CIMENT

On a utilisé du ciment portland ordinaire, de type I de l'ASTM. Ses propriétés physiques et sa composition chimique sont données au Tableau 7.

GRANULATS

La fraction des gros granulats était composée de calcaire concassé de 19 mm et la fraction des granulats fins était composée de sable naturel local.

Afin de garder la granularité uniforme dans chaque mélange, on a séparé les granulats fins et les gros granulats en fractions granulométriques différentes qui ont ensuite été recombinées suivant une granularité donnée.

La densité et le pourcentage d'absorption des gros granulats étaient de 2,69 et 0,8 % respectivement; les valeurs correspondantes pour les granulats fins étaient de 2,70 et 1,1 %.

ENTRAÎNEUR D'AIR

On a utilisé un entraîneur d'air de type hydrocarbure sulfoné. On l'a dosé de façon à obtenir une teneur en air de 6 ± 0,5 % dans tous les mélanges.

DOSAGE DES MÉLANGES

Les dosages des mélanges de béton sont montrés au Tableau 8. On a dosé deux mélanges de béton témoin de façon à obtenir un rapport eau/ciment de 0,50 et un affaissement de 75 ± 15 mm. Dans les onze mélanges contenant des cendres volantes, on a utilisé 20 % de cendres volantes, en masse, pour remplacer partiellement le ciment. La teneur en eau des mélanges à cendres volantes a été maintenue identique à celle du béton témoin, indépendamment des variations de l'affaissement. Cette mesure a été prise afin de maintenir un rapport eau/matériaux liants constant de 0,50 pour tous les mélanges.

PROPRIÉTÉS DU BÉTON FRAIS

Tous les mélanges, y compris les deux mélanges témoins, ont été préparés en gâchées triples de façon à fournir un nombre suffisant d'éprouvettes pour les exigences du programme. Le malaxage a été effectué dans un malaxeur à bac à contre-courant de laboratoire, et les cendres volantes ont été ajoutées en même temps que le ciment. La durée totale du malaxage a été de 6 minutes pour chaque mélange. Les propriétés du béton frais, y compris le poids unitaire, la teneur en air et l'affaissement, sont montrées au Tableau 9, et chaque valeur représente la moyenne de trois gâchées. Les caractéristiques de ressuage et de temps de prise du béton ont été déterminées à partir d'une gâchée de chaque mélange. Ces caractéristiques ont été déterminées conformément aux méthodes d'essai ASTM C 232 et ASTM C 403, mais les essais de ressuage ont été effectués sur une plus petite surface de ressuage. Les résultats des deux essais sont aussi présentés au Tableau 9.

COULÉE ET CURE DES ÉPROUVETTES

Quatorze éprouvettes cylindriques de 150 x 300 mm et dix-sept éprouvettes prismatiques de 90 x 100 x 400 mm ont été confectionnés à partir des trois gâchées de chaque mélange. Les cylindres ont été moulés en deux couches et le compactage a été effectué à l'aide d'un vibrateur interne, tandis que les prismes ont été moulés en deux couches et leur compactage a été effectué à l'aide d'une table vi ante. Après le moulage, les éprouvettes ont été recouvertes de toiles saturées en eau et laissées dans la salle de moulage à 23 ± 1,7 °C pendant 24 h. Elles ont ensuite été démoulées et transférées dans une salle de conservation en atmosphère humide standard jusqu'à ce qu'on en ait besoin pour des essais. Les seules exceptions concernaient les prismes servant aux essais de retrait qui ont été placés sous de l'eau saturée en chaux à 23 ± 1,7 °C jusqu'à ce qu'on en ait besoin pour des essais de retrait.

ESSAI DES ÉPROUVETTES

Le programme d'essai est présenté au Tableau 10. On a utilisé les cylindres confectionnés à partir de la première gâchée de chaque mélange pour déterminer le développement de la résistance à la compression du béton à des âges allant jusqu'à 365 jours. On a utilisé les prismes confectionnés à partir de la deuxième gâchée pour déterminer la résistance à la flexion à des âges allant jusqu'à 91 jours. On a aussi confectionné, à partir de la même gâchée, des prismes servant à déterminer la résistance au gel et au dégel. Ces essais ont été effectués à l'aide de la méthode A de la norme ASTM C 666, les éprouvettes étant soumises au total à 500 cycles rapides de gel et de dégel. Des cylindres préparés à partir de la troisième gâchée ont été utilisés pour la détermination du module d'élasticité à 28 jours et pour des essais de fluage; ces derniers essais ont été effectués après une période initiale de conservation en atmosphère humide de 91 jours. On a déterminé les valeurs du fluage sur une période de neuf mois avec une contrainte appliquée constante de 9,70 MPa, ce qui correspondait, dans la plupart des cas, à environ 30 % de la résistance à la compression du béton au moment du chargement. De plus, des prismes confectionnés à partir de la troisième gâchée ont été soumis à des essais de retrait au séchage après une période de cure initiale dans l'eau de 7 ou 91 jours. On a mesuré le retrait et les pertes d'humidité sur une période de séchage à l'air de 224 jours à 23 ± 1,7 °C et à 50 ±4 % d'humidité relative. À des fins de réfé-

à partir des deuxième et troisième gâchées ont été soumis à des essais de compression à 28 jours. Dans la mesure du possible, tous les essais ont été effectués conformément aux méthodes d'essai normalisées de l'ASTM indiquées au Tableau 10.

RÉSULTATS DES ESSAIS

Les résultats des essais de résistance à la compression et à la flexion, de même que les données relatives au module d'élasticité des mélanges témoins et des mélanges contenant des cendres volantes sont présentés au Tableau 11. Les plages de résistance à la compression et à la flexion obtenues avec les différents bétons contenant des cendres volantes à des âges différents sont présentées aux Figures 7 et 8. Un résumé des résultats d'essais de retrait et de fluage est donné dans les Tableaux 12 et 13, et les données sont représentées dans les Figures 9 à 11. Les facteurs de durabilité et les paramètres du réseau de bulles d'air du béton durci sont donnés dans le Tableau 14; les résultats des essais de gel et de dégel sont résumés au Tableau 15. Les résultats détaillés des essais de gel et de dégel sont donnés dans l'Annexe A.

DISCUSSION DES RÉSULTATS DES ESSAIS

CARACTÉRISATION

COMPOSITION MINÉRALOGIQUE

En général, la composition minéralogique des cendres volantes déterminée par diffraction des rayons X semblait dépendre du type et de la source des cendres. En plus de contenir une quantité importante de matière vitreuse, chaque cendre volante examinée contenait une ou plusieurs des quatre principales phases cristallines, c.-à-d. quartz, mullite, magnétite et hématite; cependant, la proportion relative de chaque phase variait considérablement d'une cendre à l'autre (Tableau 1). Par exemple, on a trouvé que le pourcentage de mullite variait de 3 à 24 % dans les cendres bitumineuses et de 6 à 12 % dans les cendres subbitumineuses; cette phase n'a pas été détectée dans les cendres de lignite. De même, la teneur en magnétite variait de 4 à 17 % dans les cendres bitumineuses, et elle était apparemment nulle dans les cendres subbitumineuses et les cendres de lignite. La teneur en matière vitreuse, qui est généralement considérée comme un facteur important en ce qui a trait à l'activité pouzzolanique, a été estimée par différence à partir de la quantité totale de toutes les phases cristallines à laquelle on a ajouté la perte au feu. La teneur en verre calculée de cette façon était comprise entre 55 et 95 %, les plus faibles valeurs étant associées aux cendres bitumineuses dont la perte au feu était relativement élevée et les valeurs les plus élevées étant obtenues avec les cendres volantes de lignite.

COMPOSITION CHIMIQUE

Les données relatives aux essais chimiques montrent une vaste gamme de compositions des cendres volantes étudiées, ce qui reflète les grandes variations des types de charbon et des conditions d'exploitation dans les différentes centrales thermiques partout au pays. Les six cendres d'origine bitumineuse (n^{os} 1 à 6) ont une teneur élevée en SiO_2, Al_2O_3 et Fe_2O_3 combinés, de même que des teneurs relativement faibles en CaO et MgO (Tableau 2). Les cendres n^{os} 3 et 4 sont un peu exceptionnelles en ce sens qu'elles contiennent 40 % ou plus de fer. Les cendres n^{os} 5 et 6 ont une perte au feu particulièrement élevée, avec des valeurs d'environ 7 et 10 % respectivement. La teneur en alcalis (en Na_2O équivalent) des cendres bitumineuses est comprise entre 1,15 et 2,62 %, le principal composant étant le potassium. Les trois cendres subbitumineuses (n^{os} 7 à 9) contiennent beaucoup moins de Fe_2O_3 que les cendres bitumineuses, mais elles sont un peu plus riches en SiO_2. Elles ont aussi une teneur en CaO plus élevée, dépassant légèrement 10 %, et on les qualifie parfois de cendres à forte teneur en calcium. La teneur en alcalis de ces cendres est très variable, allant de 0,77 à plus de 5,3 %, tandis que leur perte au feu est toujours faible : elle est inférieure à 1 % dans les trois cas. Les deux cendres de lignite (n^{os} 10 et 11) sont caractérisées par des teneurs plus faibles en SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 combinés et des teneurs plus élevées en CaO et MgO, comparativement aux deux types de cendres susmentionnés. La teneur en CaO atteint environ 13 % dans chaque cas et ces cendres sont généralement qualifiées de cendres volantes à forte teneur en calcium. Ces deux cendres sont en plus caractérisées par une forte teneur en alcalis (6,8 et 7,8 %), le sodium étant le principal composant. La perte au feu des deux cendres est relativement faible (valeurs inférieures à 1 %), mais la cendre n° 11 présente une caractéristique particulière : elle contient plus de 7,8 % de SO_3, comparativement à une valeur maximale de 1,4 % pour les autres cendres. On a cependant trouvé ultérieurement que cette teneur

élevée en SO_3 reflétait certaines conditions particulières relatives à l'exploitation des centrales et à la récupération des cendres au moment de l'échantillonnage, et on croit qu'elle n'est pas représentative des cendres produites actuellement à cette source.

Comme le montre le Tableau 6, toutes les cendres volantes satisfont aux exigences chimiques des normes canadiennes (ACNOR A23.5-M82), à l'exception de la cendre n° 11 qui, telle qu'utilisée dans l'étude, ne respecte pas la limite spécifiée concernant la teneur en SO_3. En ce qui a trait au respect de la norme ASTM C 618, deux autres cendres (n^{os} 5 et 6) ne satisfont pas aux exigences chimiques parce que leur perte au feu dépasse la limite de 6 % établie dans ces normes.

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

On a observé que les caractéristiques physiques des cendres volantes, comme on l'a observé pour la composition chimique, présentent de grandes variations. La densité, par exemple, était comprise entre une valeur minimale de 1,90 dans le cas de la cendre subbitumineuse n° 7 et une valeur maximale de 2,96 dans le cas de la cendre bitumineuse n° 4, qui est riche en fer (Tableau 4). Les trois cendres subbitumineuses avaient des densités relativement faibles, voisines de 2,0, ce qui porte à croire que des particules creuses, par exemple des cénosphères ou des "plérosphères" (Fig. 4a)) sont présentes en proportions appréciables dans ces cendres. Les résultats de la détermination de la finesse par tamisage humide ont aussi montré de grandes variations d'une cendre à l'autre, les valeurs non corrigées du refus sur un tamis de 45 µm étant comprises entre moins de 2,4 % dans le cas de la cendre n° 11 et plus de 39,7 % dans le cas de la cendre volante n° 9; les valeurs correspondantes obtenues par tamisage à sec sur un appareil "Alpine Jet" étaient de 2,5 et 33,0 % respectivement. Il n'y avait aucune relation évidente entre le type de cendre et sa finesse déterminée à l'aide d'un tamis de 45 µm, cette dernière étant probablement plus dépendante de facteurs comme la combustion du charbon de même que la récupération et la classification des cendres que de la nature du charbon même. De même, le type de cendre n'avait aucun effet évident sur la surface spécifique déterminée à l'aide de l'appareil Blaine, pour laquelle on a trouvé des valeurs comprises entre un minimum de 130 m^2/kg dans le cas de la cendre bitumineuse n° 3 et un maximum dépassant 580 m^2/kg dans le cas de la cendre de lignite n° 11. De plus, sauf pour la dernière cendre (laquelle appartenait à une plage de finesse qui lui était propre), il semblait y avoir très peu de relation entre la surface spécifique déterminée à l'aide de l'appareil Blaine et la finesse déterminée à l'aide d'un tamis de 45 µm. Cette caractéristique est probablement due aux différentes configurations de distribution granulométrique des différentes cendres volantes qui, bien qu'elles ne soient pas représentées ici, ont été observées à l'intérieur de l'étendue granulométrique montrée à la Figure 5. Par exemple, le pourcentage de volume de matière plus fine que 10 µm, qui est compris entre environ 15 et 40 % (sauf dans le cas de la cendre n° 11) et qui influe grandement sur la valeur de la surface spécifique, produit peu d'effets sur le pourcentage de matière qui passe à travers un tamis de 45 µm.

Les exigences physiques des normes ACNOR A23.5 et ASTM C 618 comprennent une valeur maximale de 34 % pour la quantité de matière retenue sur un tamis de 45 µm lorsqu'on effectue un tamisage humide (Tableau 6). À cet égard, deux cendres (n^{os} 6 et 9) n'ont pas satisfait aux spécifications.

PROPRIÉTÉS POUZZOLANIQUES

Les résultats des essais portant sur l'activité pouzzolanique indiquent que toutes les cendres volantes satisfont aux exigences de l'ACNOR relatives à l'activité pouzzolanique, mais que quatre de ces cendres ne satisfont pas aux exigences correspondantes de l'ASTM (Tableau 6). Ce manque de conformité est dû au fait qu'un des indices d'activité ou les deux sont légèrement inférieurs à la valeur minimale spécifiée. Comme le montre la Figure 6, il existe un degré élevé de corrélation entre les résultats de l'essai accéléré d'activité pouzzolanique (cure à 65 °C pendant 7 jours) et ceux de l'essai d'activité pouzzolanique standard (cure à 38 °C pendant 28 jours), le coefficient de corrélation étant de 0,98. Cette corrélation indique que le premier essai est un candidat potentiel pour remplacer le dernier essai dans la spécification C 618 de l'ASTM.

On n'a pas essayé d'établir des corrélations entre les différentes caractéristiques des cendres volantes, y compris l'indice d'activité pouzzolanique. Ces corrélations, bien qu'elles soient intéressantes donnent peu de renseignements utiles en vue de l'utilisation concrète des cendres

volantes. De même, aucune tentative n'a été faiteen vue d'établir une corrélation entre les indices d'activité et la résistance du béton.

PROPRIÉTÉS DU BÉTON FRAIS

Les cendres volantes ont été ajoutées au béton pour remplacer directement, en masse, une partie du ciment portland, tandis que le rapport eau/matériaux liants des mélanges a été maintenu constant. Cette mesure a été prise afin de fournir une base uniforme pour l'évaluation comparative des propriétés pouzzolaniques des différentes cendres volantes et de leur performance dans le béton. En pratique, on peut être appelé à adopter une approche différente en matière de dosage si on veut optimiser pleinement l'utilisation d'une cendre volante donnée en vue d'une application particulière.

AFFAISSEMENT

On considère souvent que les cendres volantes, en raison de certaines caractéristiques, par exemple la forme et la distribution granulométrique des particules, devraient normalement contribuer à réduire dans une certaine mesure la demande d'eau du béton dans lequel elles sont utilisées comme substitut partiel du ciment. Dans une certaine mesure, on a observé que c'est effectivement ce qui se produisait avec la plupart des cendres volantes étudiées. L'utilisation d'une quantité donnée d'eau a généralement entraîné un accroissement de l'affaissement des mélanges contenant des cendres volantes, l'accroissement par rapport aux mélanges témoins étant compris entre 30 et 70 mm (Tableau 9). Les mélanges pour lesquels on n'a pas observé cet accroissement étaient les mélanges contenant les cendres volantes n^{os} 5 et 6, pour lesquels l'addition de cendres semblait avoir peu d'effets sur l'affaissement du béton. Dans les deux cas, cependant, ce plus faible affaissement peut s'expliquer par la perte au feu relativement élevée de ces cendres.

DOSAGE EN ENTRAÎNEUR D'AIR

On n'a éprouvé aucun problème à maintenir une teneur en air de 6 à 6,5 % dans tous les mélanges de béton. En général, le dosage requis en entraîneur d'air dépendait peu de la présence de cendres volantes. Il y a cependant eu deux exceptions : les mélanges contenant les cendres bitumineuses n^{os} 5 et 6, pour lesquels la quantité d'entraîneur requis était dans chaque cas environ quatre fois plus élevée que dans le mélange témoin (Tableau 8). Cette caractéristique peut une fois de plus être attribuée à la perte au feu ou à la teneur en carbone élevées de ces deux cendres.

TEMPS DE PRISE

On a observé que la plupart des cendres volantes accroissaient le temps de prise du béton, les deux seules exceptions étant une cendre subbitumineuse et une cendre de lignite (n^{os} 7 et 11 respectivement), qui avaient apparemment peu d'effets sur le temps de prise initiale ou finale. Pour toutes les autres cendres, l'accroissement du temps de prise était généralement compris entre 0,5 et 3 h dans le cas de la prise initiale, et entre 1 et 4 h dans le cas de la prise finale (Tableau 9). L'accroissement du temps de prise est dû principalement à la réduction du dosage en ciment et à l'accroissement du rapport eau/ciment résultant de l'addition de cendres volantes au béton. Cependant, la grande étendue de l'accroissement du temps de prise observée porte aussi à croire que, dans plusieurs cas, les caractéristiques chimiques des cendres peuvent avoir contribué de façon appréciable à atténuer ou à accentuer l'accroissement du temps de prise.

RESSUAGE

Les résultats des essais de ressuage ont été exprimés sous forme d'un pourcentage total de perte par unité d'eau initialement présente dans les mélanges de béton. Dans le cas du béton témoin, le pourcentage de perte était de 2,9 %; dans le cas des bétons contenant des cendres volantes, il variait de 0,6 à 5,6 % (Tableau 9). Bien que les résultats n'aient pas montré de patron évident, la plupart des bétons contenant des cendres volantes avaient des pertes par ressuage comparables ou légèrement supérieures à celles du béton témoin. La seule exception était le béton contenant de la cendre volante n° 11, dont le taux de ressuage était inférieur, probablement en raison de sa surface spécifique relativement élevée ou de sa forte teneur en alcalis et en soufre (Tableaux 2 et 4). Pour la plupart des autres bétons contenant des cendres volantes, le léger accroissement du ressuage, par comparaison avec celui du béton témoin, peut être dû à une surface spécifique généralement plus faible des cendres volantes ou à un affaissement supérieur du béton, ou au deux.

PROPRIÉTÉS DU BÉTON DURCI

RÉSISTANCE À LA COMPRESSION

Le développement de la résistance à la compression du béton témoin et des bétons contenant des cendres volantes est représenté à la Figure 7. Cette figure montre la plage des valeurs de la résistance obtenue avec les différents bétons contenant des cendres volantes à des âges allant jusqu'à 365 jours, de même que la résistance du béton témoin. Jusqu'à 28 jours, la résistance du béton témoin était presque toujours supérieure à celle des bétons contenant des cendres volantes. Le seul cas où la résistance du béton contenant des cendres volantes était à peu près égale à celle du béton témoin pendant cette période a été observé au bout de 28 jours avec le béton contenant la cendre volante de lignite n° 11. Pour les autres bétons contenant des cendres volantes, la résistance à la compression au bout de 28 jours était comprise entre environ 70 et 95 % de la résistance du béton témoin (Tableau II).

À 91 jours, les deux bétons contenant des cendres de lignite ainsi que deux des bétons contenant des cendres bitumineuses avaient des résistances égales ou légèrement supérieures à celle du béton témoin; tous les autres bétons contenant des cendres avaient une résistance encore inférieure à celle du béton témoin. Au bout de 365 jours, 6 des 11 bétons contenant des cendres volantes avaient atteint des résistances dépassant celle du béton témoin, tandis que les autres bétons avaient des résistances qui étaient encore inférieures de 5 à 10 % à la résistance du béton témoin.

Dans une certaine mesure, les résultats ci-dessus sont conformes aux observations faites couramment, selon lesquelles les cendres volantes à forte teneur en calcium permettent un gain appréciable de résistance à des âges relativement jeunes, contrairement aux cendres volantes à faible teneur en calcium dont la contribution à la résistance devient très importante seulement après 56 jours. Deux exceptions évidentes étaient les bétons contenant les cendres volantes n^{os} 7 et 9 à forte teneur en calcium pour lesquels le développement de la résistance pendant le jeune âge ne différait pas de façon appréciable de celui de la plupart des bétons contenant des cendres volantes à faible teneur en calcium. Cependant, cette caractéristique peut être due à la quantité particulièrement importante de matière grossière contenue dans ces deux cendres, comme le montrent les résultats des essais de détermination de la finesse (Tableau 4). Le plus haut niveau de résistance après un an de conservation en atmosphère humide a été obtenu avec un béton contenant des cendres volantes bitumineuses à faible teneur en calcium et ayant la perte au feu la plus élevée. D'après les résultats, il semble qu'en général le niveau de résistance à la compression atteint peut dépendre davantage de la finesse et de la distribution granulométrique de la cendre que de sa composition.

RÉSISTANCE À LA FLEXION

Comme la résistance à la compression, la résistance à la flexion des bétons contenant des cendres volantes était toujours inférieure à celle du béton témoin aux âges allant jusqu'à 28 jours (Fig. 8). La seule exception était, une fois encore, le béton contenant la cendre volante de lignite n° 11, dont la résistance à la flexion était comparable à celle du béton témoin à 14 ou à 28 jours (Tableau II). À 91 jours, seuls le béton contenant la cendre de lignite susmentionnée et un béton contenant de la cendre subbitumineuse avaient une résistance à la flexion légèrement supérieure à celle du béton témoin. Pour tous les autres bétons contenant des cendres, la résistance à la flexion au bout de 91 jours était encore inférieure d'environ 5 à 10 % à celle du béton témoin.

MODULE D'ÉLASTICITÉ DE YOUNG

Les valeurs du module d'élasticité de Young au bout de 28 jours pour les bétons contenant des cendres volantes variaient de 29,0 à 35,8 GPa, comparativement à une valeur de 33,5 GPa pour le béton témoin (Tableau II). Les données ne fournissent aucune indication évidente d'un effet appréciable des cendres volantes ou du type de cendres volantes sur le module d'élasticité de Young. L'effet, s'il en existe un, peut être masqué par la variabilité de l'essai.

RETRAIT AU SÉCHAGE

Les pertes d'humidité et le retrait au séchage ont été déterminés sur une période de 224 jours, après une cure initiale de 7 ou 91 jours dans de l'eau saturée en chaux.

Dans le cas du béton ayant subi une cure initiale de 7 jours, la perte d'humidité totale des bétons contenant des cendres volantes variait de 49,5 à 64,3 %, comparativement à 55,0 % dans le cas du béton témoin. Dans le cas d'une cure initiale de 91 jours, la plage correspondante était de 45,4 à 56,3 %, avec une valeur de 53,7 % pour le béton témoin. Dans les deux cas, il n'y a aucune indication évidente de la contribution des cendres volantes aux variations de la perte d'humidité.

D'autre part, le retrait au séchage du béton ayant subi une cure initiale de 7 jours dans l'eau semblait peu dépendre de la présence de cendres volantes, les valeurs des déformations du béton témoin et de la plupart des bétons contenant des cendres volantes étant très rapprochées les unes des autres pendant les 224 premiers jours de séchage (Fig. 9). Seul le béton contenant la cendre volante de lignite n° 10 présentait une déviation appréciable; dans ce cas, on a trouvé que le retrait total dépassait la déformation moyenne d'environ 50 %. Dans le cas du béton ayant subi une cure initiale de 91 jours, les caractéristiques étaient assez similaires à celles observées dans le cas du béton ayant subi une cure initiale de 7 jours, sauf que le retrait total de la plupart des bétons contenant des cendres volantes était légèrement inférieur à celui du béton témoin (Fig. 10).

FLUAGE

La Figure 11 montre les données relatives au fluage des bétons témoins et des bétons contenant des cendres volantes. On remarque que tous les bétons contenant des cendres volantes présentent un fluage qui est toujours inférieur à celui du béton témoin. La réduction de déformation, qui dans la plupart des cas varie de 20 à 45 %, ne semble pas dépendre du type de cendre. L'effet des cendres volantes sur le fluage du béton ressemble dans une certaine mesure à celui observé dans le cas du retrait au séchage du béton ayant subi une cure initiale de 91 jours. Dans les deux cas, les plus faibles déformations des bétons contenant des cendres volantes sont probablement dues à la fraction relativement importante de cendres n'ayant pas encore réagi à l'âge considéré et qui agissent ainsi comme un granulat imposant une restriction accrue.

RÉSISTANCE AU GEL ET AU DÉGEL

On a commencé les essais de gel et de dégel* sur tous les bétons à l'âge de 14 jours, de sorte qu'un grand nombre des éprouvettes de béton contenant des cendres volantes avaient une résistance encore beaucoup plus faible que celle des éprouvettes témoins au moment de l'essai. Malgré ce facteur, tous les bétons, indépendamment de la résistance, se sont bien comportés lorsqu'ils ont été soumis à des cycles rapides de gel et de dégel, le facteur de durabilité étant compris entre 95,8 et 98,8 % dans tous les cas après 300 cycles (Tableau 14). Cette excellente résistance aux cycles de gel et de dégel du béton témoin et des bétons contenant des cendres volantes a été aussi confirmée par les variations relativement faibles enregistrées dans les mesures du poids, de la longueur, de la vitesse d'impulsion et de la fréquence de résonance de même que par l'aspect visible inchangé de toutes les éprouvettes après une exposition à plus de 500 cycles (Tableau 15). De plus, après cette exposition, les résistances résiduelles des éprouvettes de béton témoin et de béton contenant des cendres volantes étaient du même ordre de grandeur. Bien que dans chaque cas les résultats semblent indiquer une baisse importante de la résistance du béton pendant l'exposition, cette baisse est en réalité due au fait que les résistances résiduelles sont exprimées sous forme d'un pourcentage de la résistance du béton du même mélange conservé en atmosphère humide dont la maturité est de toute évidence totalement différente. Le comportement des éprouvettes de béton témoin et de béton contenant des cendres volantes soumis à des cycles de gel et de dégel est hors de tout doute dû à un système de bulles d'air adéquat du béton dans chaques cas comme le montre le Tableau 14, et au fait que le béton avait une résistance à la compression d'au moins 20 MPa environ au moment de l'application des cycles (Fig. 7). Les facteurs d'espacement varient de 0,09 à 0,13 mm pour toutes les éprouvettes, ce qui est bien inférieur à la valeur de 0,20 mm qui est généralement acceptée comme limite raisonnable pour assurer la résistance au gel du béton (26). D'après les résultats, il est évident que le facteur d'espacement est essentiellement indépendant de la

* Méthode A de la norme ASTM C 666, gel dans l'eau et dégel dans l'eau.

présence de cendres volantes, à condition que le dosage en entraîneur d'air soit ajusté de façon à donner la même teneur en air.

CONCLUSIONS

Les propriétés physiques, minéralogiques, chimiques et pouzzolaniques des cendres volantes sur lesquelles a porté l'étude présentent de grandes variations, mais on retrouve la même variabilité dans les cendres volantes disponibles dans d'autres pays. En dépit de cette caractéristique, toutes les cendres volantes étudiées sont utilisables dans le béton et certaines sont déjà commercialisées. Étant donné que chaque cendre volante est unique, on recommande aux utilisateurs de mener un programme de mélange d'essai afin d'établir les dosages de mélange et la demande d'eau appropriés pour la cendre volante étudiée. En général, la demande d'eau des bétons contenant des cendres volantes, comme le montre l'accroissement de l'affaissement de ces bétons, est plus faible que celle du béton témoin; cependant, il existe des exceptions, comme on le mentionne dans le rapport.

On a observé que la résistance des bétons contenant des cendres volantes augmente avec le temps mais, même au bout de 365 jours, la résistance à la compression de certains des bétons contenant des cendres volantes n'atteint pas les niveaux de résistance du béton témoin. Cette caractéristique est importante et il faut en tenir compte lors du dosage des bétons contenant des cendres volantes.

Tous les bétons à cendres volantes ont une performance satisfaisante dans les essais de cycles rapides de gel et de dégel (méthode A de la norme ASTM C 666). Par conséquent, un béton qui a un degré satisfaisant d'entraînement d'air et dont la résistance à la compression est d'au moins 20 MPa au début de l'essai ne perd pas de résistance sous l'effet du gel, indépendamment de son contenu en cendres volantes. De plus, à une exception près, tous les bétons à cendres volantes présentent un retrait au séchage et un fluage qui sont soit égaux soit inférieurs à ceux du béton témoin.

Les résultats d'essais mentionnés et les conclusions tirées s'appliquent aux échantillons de cendres volantes mises à l'essai dans la présente étude et au type de ciment utilisé. Ils peuvent être applicables ou non à d'autres types de cendres volantes et de ciments.

BIBLIOGRAPHIE

1. Malhotra, V.M.; Berry, E.E.; et Wheat, T.A., Rédacteurs. *Proceedings, Seminar on Energy and Resources Conservation in the Cement and Concrete Industry*; CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1976.

2. Berry, E.E. "Fly ash for use in concrete. Part 1 - A critical review of the chemical, physical and pozzolanic properties of fly ash"; *Rapport de CANMET* 76-25; CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 60 p.; 1976.

3. Berry, E.E. et Malhotra, V.M. "Fly ash for use in concrete - A critical review"; *ACI Journal, Proceedings* 77:2:59-73; 1980.

4. Malhotra, V.M. "Strength and durability characteristics of concrete incorporating a pelletized blast-furnace slag"; *ACI Special Publication SP 79* 2:891-922; Rédacteur, V.M. Malhotra; 1983.

5. Malhotra, V.M.; Carette, G.G.; et Bremner, T.W. "Durability of concrete in marine environment containing granulated blast furnace slag or fly ash or both"; *ACI Special Publication SP* 65 1:157-168; Rédacteur, V.M. Malhotra; 1980.

6. Mukherjee, P.K.; Loughborough, M.T.; et Malhotra, V.M. "Development of high-strength concrete incorporating a large percentage of fly ash and superplasticizers"; *ASTM Cement, Concrete and Aggregates* 4:2:81-86; 1983.

7. Carette, G.G. et Malhotra, V.M. "Mechanical properties, durability and drying shrinkage of portland cement concrete incorporating silica fume"; *ASTM Cement, Concrete and Aggregates* 5:1:3-13; 1983.

8. Malhotra, V.M. et Carette, G.G. "Silica fume - Its use in concrete"; *Concrete Construction* 27:5:443-446; Chicago, É.-U.; mai 1982.

9. Malhotra, V.M. et Carette G.G. "Silica fume concrete - Properties, applications and limitations"; *ACI Concrete International : Design and Construction* 5:5:40-46; mai 1983.

10. Carette, G.G. et Malhotra, V.M. "Early-age strength development of concrete incorporating fly ash and condensed silica fume"; *ACI Special Publication SP 79* 2:765-786; Rédacteur, V.M. Malhotra; 1984.

11. Carette, G.G.; Malhotra, V.M. et Aitcin, P.C. "Mechanical properties of portland cement concrete incorporating blast-furnace slag and condensed silica fume"; *Rapport de division* MRP/MSL 84-73 (OP&J); CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada, 21 p.; 1984.

12. Malhotra, V.M. "Mechanical properties and freezing and thawing resistance of non air-entrained, air-entrained, and air-entrained superplasticized concrete using ASTM Test C 666, Procedures A and B"; *ASTM Cement, Concrete and Aggregates* 4:1:3-23; 1982.

13. Carette, G.G.; Wilson, H.S. et Tan, C.W. "Development of superplasticized lightweight high-strength concrete incorporating steel fibres, silica fume and fly ash"; *Rapport de division* MRP/MSL 84-81 (IR); CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 25 p.; 1984.

14. Nebesar, B. et Carette G.G. "Variations in the chemical composition, specific surface area, fineness and pozzolanic activity of a condensed silica fume"; *Rapport de division* MRP/MSL 84-126 (J); CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 13 p.; septembre 1984.

15. Malhotra, V.M. "Mechanical properties and freezing and thawing resistance of non air-entrained and air-entrained condensed silica-fume concrete using ASTM Test C 666, Procedures A and B"; *ACI Special Publication SP 91* 2:1069-1093; Rédacteur, V.M. Malhotra; 1986.

16. Berry, E.E. et Malhotra, V.M. "Fly ash in concrete"; *Rapport de division* MRP/MSL 84-156 (TR); CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 247 p.; décembre 1984.

17. Berry, E.E. et Malhotra, V.M. "Compilation of Abstracts of papers from recent international conferences and symposia on fly ash in concrete"; 60 p.; janvier 1985; disponible auprès des auteurs au CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada, Ottawa.

18. Carette, G.G.; Malhotra, V.M.; Bédard, C.; De Benedictis, V.; et Plumat, M. "Development of heat-curing cycles for portland cement/fly ash concrete for the precast industry"; *ACI Special Publication SP 91* 1:249-272; Rédacteur, V.M. Malhotra; 1986.

19. Douglas, E. et Mainwaring, P.R. "Hydration and pozzolanic activity of non-ferrous slags"; *American Ceramic Society Bulletin* 64:5:700-706; 1985.

20. Douglas, E.; Malhotra, V.M.; et Emery, J.J. "Cementitious properties of non-ferrous slags from Canadian sources"; *ASTM Cement, Concrete and Aggregates* 7:1:3-14; été 1985.

21. Douglas, E.; Mainwaring, P.R.; et Hemmings, R.T. "Pozzolanic properties of Canadian non-ferrous slags"; *ACI Special Publication SP 91* 2:1525-1551; Rédacteur, V.M. Malhotra; 1986.

22. Douglas, E. et Malhotra, V.M. "Étude des propriétés et de la résistance de liants de base de ciment Portland et de laitiers non ferreux"; *Rapport de CANMET* 85-7F; CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1986.

23. van Roode, M. et Hemmings, R.T. Rapport du contrat n° 1SQ83-00162 du CANMET; Énergie, Mines et Ressources Canada; 285 p; juillet 1985.

24. Malhotra, V.M., et Wallace, G.G. "A new method for determining fineness of cement"; *Rapport d'étude de la Direction des mines* (IR) 63-119; Énergie, Mines et Ressources Canada; 12 p.; décembre 1963.

25. Zerbino, R.; Carette, G.G. et Malhotra, V.M. "Fineness and Particle Size Determination of Fly Ashes"; *Rapport de division* MRP/MSL 86-9 (IR), CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; Ottawa, 1986.

26. *ACI Manual of Concrete Practice*, Part 1; American Concrete Institute; Detroit, É.-U.; 1985.

TABLEAUX

Tableau 1 - Composition minéralogique de certaines cendres volantes

Source de cendres volantes	Type de charbon*	Composition de phase, pour cent					Perte au feu, %
		Verre	Quartz	Mullite	Magnétite	Hématite	
1	B	72.1	4.0	12.6	6.2	1.6	3.5
4	B	70.1	3.2	3.3	17.2	4.7	1.5
5	B	55.6	6.2	19.8	5.6	3.1	9.7
6	B	54.2	8.3	23.5	4.4	2.1	7.5
7	SB	90.2	2.9	6.1	--	---	0.8
8	SB	83.9	4.1	10.2	--	1.4	0.4
9	SB	79.8	8.7	11.5	--	---	0.8
10	L	94.5	4.6	--	--	---	0.9

*B : bitumineux; SB : subbitumineux; L : lignite.

Tableau 2 - Composition chimique des cendres volantes - Éléments principaux et secondaires

Source de cendres volantes	Type de charbon*	Composition chimique**, masse en pour cent												
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO	BaO	SO_3	Perte au feu***
1	B	47.1	23.0	20.4	1.21	1.17	0.54	3.16	0.85	0.16	0.78	0.07	0.67	2.88
2	B	44.1	21.4	26.8	1.95	0.99	0.56	2.32	0.80	0.27	0.12	0.07	0.96	0.70
3	B	35.5	12.5	44.7	1.89	0.63	0.10	1.75	0.56	0.59	0.12	0.04	0.75	0.75
4	B	38.3	12.8	39.7	4.49	0.43	0.14	1.54	0.59	1.54	0.20	0.04	1.34	0.88
5	B	45.1	22.2	15.7	3.77	0.91	0.58	1.52	0.98	0.32	0.32	0.12	1.40	9.72
6	B	48.0	21.5	10.6	6.72	0.96	0.56	0.86	0.91	0.26	0.36	0.21	0.52	6.89
7	SB	55.7	20.4	4.61	10.7	1.53	4.65	1.00	0.43	0.41	0.50	0.75	0.38	0.44
8	SB	55.6	23.1	3.48	12.3	1.21	1.67	0.50	0.64	0.13	0.56	0.47	0.30	0.29
9	SB	62.1	21.4	2.99	11.0	1.76	0.30	0.72	0.65	0.10	0.69	0.33	0.16	0.70
10	L	46.3	22.1	3.10	13.3	3.11	7.30	0.78	0.78	0.44	0.13	1.18	0.80	0.65
11	L	44.5	21.1	3.38	12.9	3.10	6.25	0.80	0.94	0.66	0.17	1.22	7.81	0.82

*B : bitumineux; SB : subbitumineux; L : lignite.

** Par spectrométrie en plasma d'argon à couplage inductif (ICAP), à l'exception du Na_2O, du K_2O, du SO_3 et de la perte au feu.

*** Entre 105 et 750 °C.

Tableau 3 - Composition chimique des cendres volantes - Éléments traces

Source de cendres volantes	Type de charbon*	Composition chimique**, ppm													
		Cu	Pb	Zn	Ni	Co	Be	Cd	Mo	Cr	Sr	Th	Zr	V	Ag
1	B	106	198	349	98	12	9	<1	40	110	344	54	135	200	<.5
2	B	128	295	698	295	15	9	2	110	132	526	57	142	215	<.5
3	B	123	<5	121	76	<5	8	<1	150	57	213	39	115	185	<.5
4	B	157	38	155	73	<5	11	<1	215	56	295	46	99	146	<.5
5	B	103	48	162	106	18	13	<1	30	139	1225	56	137	219	<.5
6	B	69	40	87	58	9	8	<1	35	60	992	54	87	142	<.5
7	SB	28	68	77	50	<5	6	2	60	30	2185	40	192	56	<.5
8	SB	37	73	71	40	<5	6	<1	55	30	1085	45	309	62	<.5
9	SB	35	40	58	44	<5	5	<1	45	35	738	42	264	81	<.5
10	L	52	58	48	36	<5	6	<1	35	41	3520	26	267	78	<.5
11	L	73	83	120	41	<5	7	<1	55	56	3435	27	250	125	<.5

*B : bitumineux; SB : subbitumineux; L : lignite.
** Par spectrométrie en plasma d'argon à couplage inductif (ICAP).

Tableau 4 - Propriétés physiques des cendres volantes

Source de cendres volantes	Type de charbon*	Propriétés physiques			
		Densité (méthode Le Chatelier)	Finesse, refus en pour cent sur un tamis de 45 µm		Surface spécifique Blaine, m^2/kg
			Tamisage humide**	Tamisage à sec (Alpine jet)	
1	B	2.53	17.3 (14.9)	12.3	289
2	B	2.58	14.7 (12.7)	10.2	312
3	B	2.88	25.2 (21.7)	18.0	127
4	B	2.96	19.2 (16.6)	14.0	198
5	B	2.38	21.2 (18.3)	16.1	448
6	B	2.22	40.7 (35.1)	30.3	303
7	SB	1.90	33.2 (28.7)	26.4	215
8	SB	2.05	19.4 (16.7)	14.3	326
9	SB	2.11	46.0 (39.7)	33.0	240
10	L	2.38	24.9 (21.5)	18.8	286
11	L	2.53	2.7 (2.4)	2.5	581

*B : bitumineux; SB : subbitumineux; L : lignite.
** Les valeurs entre parenthèses ne tiennent pas compte du facteur de correction du tamis.

Tableau 5 - Propriétés pouzzolaniques des cendres volantes

Source de cendres volantes	Type de charbon*	Activité pouzzolanique avec le ciment portland**			Indice d'activité pouzzolanique avec la chaux à 7 jours, MPa
		Demande d'eau, %	Indice d'activité à 28 jours, %	Indice d'activité de l'essai accéléré à 7 jours, %	
1	B	92	98.2	90.1	6.8
2	B	92	100.0	91.5	6.3
3	B	92	73.2	71.7	5.5
4	B	92	92.3	85.6	8.8
5	B	100	93.7	87.7	7.6
6	B	104	73.7	71.2	4.5
7	SB	94	73.3	68.1	4.3
8	SB	92	94.6	85.5	6.3
9	SB	97	77.0	69.3	4.9
10	L	92	86.4	87.3	6.8
11	L	88	132.6	130.7	16.3

*B : bitumineux; SB : subbitumineux; L : lignite.
** Le ciment utilisé avait une composition et des propriétés similaires à celles montrées au Tableau 7.

Tableau 6 - Conformité des cendres volantes canadiennes aux exigences des spécifications de l'ASTM et de l'ACNOR

	Exigences de la norme ASTM C 618-84*	Exigences de la norme ACNOR A23.5-M82*	Cendre volante n°										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Exigences chimiques													
- (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3), %	Min 70**	---	90.5	92.3	92.7	90.8	83.0	80.1	80.7	82.2	86.5	71.5	69.0
- SO_3, %	Max 5.0	Max 5.0	0.67	0.96	0.75	1.34	1.40	0.52	0.38	0.30	0.16	0.80	7.81
- Perte au feu, %	Max 6.0	Max 12.0***	2.88	0.70	0.75	0.88	9.72	6.89	0.44	0.29	0.70	0.65	0.82
Exigences physiques													
- Refus en pour cent sur un tamis de 45 um (tamisage humide)	Max 34	Max 34	17.3	14.7	25.2	19.2	21.2	40.7	33.2	19.4	46.0	24.9	2.7
- Demande d'eau, %	Max 105	---	92	92	92	92	100	104	94	92	97	92	88
- Indice d'activité pouzzolanique avec le ciment portland, %													
- Activité de l'essai accéléré ACNOR à 7 jours	---	Min 68	90.1	91.5	71.7	85.6	87.7	71.2	68.1	85.5	69.3	87.3	130.7
- Activité ASTM à 28 jours	Min 75	---	98.2	100.0	73.2	92.3	93.7	73.7	73.3	94.6	77.0	86.4	132.6
- Activité pouzzolanique avec la chaux, MPa	Min 5.5	---	6.8	6.3	5.5	8.8	7.6	4.5	4.3	6.3	4.9	6.8	16.3

* Pour les cendres volantes des classes F et C, à moins d'indication contraire.

** Min. 60 pour la classe C.

*** Max. 6,0 pour la classe C.

Tableau 7 - Propriétés physiques et composition chimique du ciment*

Propriétés physiques		Composition chimique	
Finesse			
- Refus sur un tamis de 75 µm :	96,9 %	Silice :	22.02 %
- Refus sur un tamis de 45 µm :	85,8 %	Oxyde de calcium (total) :	62,76 %
- Blaine :	363 m^2/kg	Alumine :	3,99 %
		Oxyde ferrique :	2,76 %
Consistance normale :	22,0 %	Magnésie :	3,30 %
		Trioxyde de soufre :	3,01 %
Temps de prise Vicat		Oxyde de sodium :	0,49 %
		Oxyde de potassium :	0,54 %
- Prise initiale :	180 min	Perte au feu :	1,59 %
- Prise finale :	230 min	Résidus insolubles :	0,14 %
Dilatation à l'autoclave :	0,09 %	**Composition des composés**	
Résistance à la compression de cubes de mortier de 50 mm (E/C : 0,485; étalement : 127 %)		C_3S :	48,8 %
		C_2S :	26,3 %
		C_3A :	5,9 %
		C_4AF :	8,4 %
- 3 jours :	20,8 MPa		
- 7 jours :	25,2 MPa		
- 28 jours :	33,2 MPa		

* Données fournies par le fabricant.

Tableau 8 - Dosage des mélanges de béton

Mélange n°	Source de cendres volantes	Remplacement du ciment par des cendres volantes, % par poids	E/(C + CV)*	Quantités kg/m³				A.E.A., mL/m³
				Ciment	Cendres volantes	Granulat fin	Gros granulat	
Témoin 1	-	0	0.50	297	--	791	1094	200
Témoin 2	-	0	0.50	295	--	782	1082	170
CV1	1	20	0.50	236	59	780	1077	320
CV2	2	20	0.50	237	59	782	1080	200
CV3	3	20	0.50	237	59	786	1088	200
CV4	4	20	0.50	238	59	792	1094	160
CV5	5	20	0.50	237	59	782	1080	690
CV6	6	20	0.50	238	59	784	1082	660
CV7	7	20	0.50	239	59	780	1077	370
CV8	8	20	0.50	236	59	775	1069	230
CV9	9	20	0.50	236	59	775	1070	240
CV10	10	20	0.50	237	59	781	1079	290
CV11	11	20	0.50	237	59	782	1080	150

* Eau/(ciment + cendres volantes) en poids.

Note : Le mélange témoin n° 1 a été fabriqué au début du programme de mélange (fév. 1984) et le mélange témoin n° 2 a été fabriqué à la fin du programme (avril 1984).

Tableau 9 - Propriétés du béton frais

Mélange n°	E/(C + CV)	Propriétés du béton frais					
		Poids unitaire, kg/m^3	Affaissement, mm	Teneur en air, %	Ressuage, %	Temps de prise, h:min	
						Initiale	Finale
Témoin 1	0.50	2320	70	6.5	---	----	-----
Témoin 2	0.50	2320	70	6.4	2.9	4:10	6:00
CV1	0.50	2300	100	6.2	3.1	4:50	8:00
CV2	0.50	2310	105	6.2	4.6	7:15	10:15
CV3	0.50	2310	100	6.2	5.1	5:20	8:10
CV4	0.50	2320	110	6.3	4.3	6:20	8:25
CV5	0.50	2310	65	6.4	2.7	5:15	8:55
CV6	0.50	2300	75	6.5	2.6	4:30	6:50
CV7	0.50	2300	100	6.1	2.9	4:15	6:20
CV8	0.50	2300	115	6.2	5.6	5:10	7:30
CV9	0.50	2280	100	6.4	4.4	5:25	9:00
CV10	0.50	2290	130	6.5	2.5	4:45	7:00
CV11	0.50	2290	140	6.6	0.6	4:00	6:05

* Eau/(ciment + cendres volantes) en poids.

Note : Les valeurs du poids unitaire, de l'affaissement et de la teneur en air sont les moyennes des trois gâchées. Les valeurs du ressuage et du temps de prise sont pour une seule gâchée.

Tableau 10 - Programme d'essai du béton durci

Gâchée n°	Type d'essai	Âge lors de l'essai, jours				
		7	14	28	91	365
1	Compression (ASTM C 39)	2 cylindres	2 cylindres	2 cylindres	2 cylindres	2 cylindres
2	Flexion (ASTM C 78)		3 prismes	3 prismes	3 prismes	
	Gel et dégel (ASTM C 666)	Deux éprouvettes prismatiques ont été exposées à des cycles répétés de gel et de dégel à la fin d'une cure en atmosphère humide de 14 jours.				
	Compression (ASTM C 39)			2 cylindres		
3	Module d'élasticité (ASTM C 469)			2 cylindres		
	Fluage (ASTM C 512)	Quatre éprouvettes cylindriques ont été soumises à des essais de fluage à la fin d'une cure en atmosphère humide de 91 jours.				
	Retrait au séchage (ASTM C 157)	Deux éprouvettes prismatiques ont été séchées à l'air à 23 °C et à une H.R. de 50 %, chacune à la fin d'une cure de 7 et 91 jours dans l'eau.				
	Compression (ASTM C 39)			2 cylindres		

Note : Pour chaque mélange, on a préparé trois gâchées de béton en vue d'obtenir toutes les éprouvettes requises.

Tableau 11 - Résumé des résultats d'essais relatifs à la résistance à la compression, à la résistance à la flexion et au module d'élasticité de Young

Mélange n°	Résistance à la compression* de cylindres de 150 x 300 mm, MPa				Résistance à la flexion** de prismes de 75 x 100 x 400 mm, MPa			Module d'élasticité* de cylindres de 150 x 300 mm, GPa
	7 jours	28 jours	91 jours	365 jours	14 jours	28 jours	91 jours	28 jours
Témoin 1	23.4	30.6	34.9	39.2	4.9	5.4	5.9	33.5
Témoin 2	22.1	28.6	32.5	36.5	4.3	4.7	5.9	--
CV1	18.4	25.7	31.4	38.3	4.4	4.4	5.4	33.0
CV2	16.9	25.2	34.8	37.0	3.9	4.8	5.5	30.2
CV3	14.4	21.0	27.6	34.4	4.0	5.0	5.3	30.0
CV4	17.8	23.3	32.3	36.9	4.1	4.4	5.2	31.5
CV5	20.1	28.0	33.9	44.3	3.5	4.4	5.3	33.0
CV6	18.4	24.8	31.8	39.2	3.5	4.6	5.6	29.0
CV7	16.7	24.1	29.1	35.7	3.9	4.5	5.4	33.0
CV8	17.9	27.7	29.0	40.4	4.6	5.0	6.1	34.1
CV9	16.7	24.9	31.1	35.6	4.3	4.2	5.7	35.8
CV10	19.2	28.5	33.7	39.7	4.1	5.1	5.8	31.3
CV11	21.1	29.4	35.3	40.1	4.8	5.3	6.6	32.9

* Chaque valeur est la moyenne obtenue pour deux essais.
**Chaque valeur est la moyenne obtenue pour trois essais.

Tableau 12 - Résumé des résultats d'essais de retrait

Mélange n°	Durée du séchage, jours	Mesures du retrait			
		Cure initiale de 7 jours dans l'eau		Cure initiale de 91 jours dans l'eau	
		Perte d'humidité*, %	Retrait au séchage, x 10^{-6}	Perte d'humidité*, %	Retrait au séchage, x 10^{-6}
Témoin 2	224	55.0	422	53.7	453
CV1	224	57.5	447	47.9	365
CV2	224	57.3	364	45.4	280
CV3	224	56.9	411	56.2	405
CV4	224	54.7	379	49.2	387
CV5	224	58.8	404	51.1	403
CV6	224	60.6	475	56.4	454
CV7	224	64.3	397	54.1	433
CV8	224	56.3	400	--	327
CV9	224	58.2	390	49.3	361
CV10	224	58.4	642	55.2	500
CV11	224	49.5	454	48.9	362

* Pourcentage de l'eau originale totale.

Tableau 13 - Résumé des résultats d'essais de fluage

Mélange n°	Âge à la mise en charge, jours	Contrainte appliquée, MPa	Rapport contrainte/résistance*, %	Durée de la mise en charge, jours	Déformation élastique initiale, x 10^{-6}	Fluage**, x 10^{-6}
Témoin 1	91	9.70	28	259	269	585
Témoin 2	91	"	30	244	275	562
CV1	91	"	31	255	248	357
CV2	90	"	28	255	247	331
CV3	91	"	35	262	299	537
CV4	90	"	30	254	273	458
CV5	99	"	29	260	255	367
CV6	91	"	31	264	252	492
CV7	90	"	33	260	263	404
CV8	90	"	33	258	237	320
CV9	91	"	31	252	237	360
CV10	91	"	29	239	262	544
CV11	91	"	27	254	264	367

* Contrainte appliquée, pourcentage de la résistance à la compression d'éprouvettes du même mélange au moment de la mise en charge.
**Fluage = déformation totale provoquée par la charge - déformation élastique initiale.

Tableau 14 - Facteurs de durabilité et paramètres du réseau de bulles d'air des mélanges de béton durci témoins et à cendres volantes.

Mélange n°	Facteur de durabilité après 300 cycles, %*	Teneur en air,** %	Surface spécifique (α), mm^{-1}	Facteur d'espacement (L), mm
Témoin 1	97.7	7.2 (6.5)	22.3	0.135
Témoin 2	98.1	7.2 (6.4)	25.2	0.108
CV1	96.4	8.0 (6.2)	20.1	0.132
CV2	98.8	8.4 (6.2)	20.4	0.124
CV3	96.8	8.3 (6.2)	23.4	0.108
CV4	98.8	8.7 (6.3)	19.5	0.108
CV5	97.2	7.9 (6.4)	26.1	0.104
CV6	96.8	- (6.5)	38.7	0.105
CV7	97.6	7.0 (6.1)	27.2	0.110
CV8	96.9	7.1 (6.2)	23.5	0.109
CV9	97.6	9.1 (6.4)	20.0	0.121
CV10	97.2	7.5 (6.5)	34.8	0.094
CV11	95.8	7.6 (6.6)	26.5	0.108

* Déterminé conformément à la norme ASTM C 666 (méthode A).
**Les valeurs entre parenthèses désignent la teneur en air du béton frais.

Tableau 15 - Résumé des résultats d'essais de gel et de dégel

Mélange n°	E/(C+CV)*	Teneur en air, %	Résumé des résultats d'essais après 500 cycles de gel et de dégel						
			Variation de poids, %	Variation de longueur, %	Variation de vitesse d'impulsion, %	Variation de fréquence longitudinale fondamentale, %	Module dynamique relatif, %	Résistance à la flexion résiduelle, ** %	Résistance résiduelle modifiée d'un cube,** %
Témoin 1	0.50	6.5	-0.44	+0.007	0.0	-0.9	98	--	83
Témoin 2	0.50	6.4	+0.06	------	+1.5	-0.4	99	70	72
CV1	0.50	6.2	+0.06	+0.006	+2.8	-1.4	97	--	74
CV2	0.50	6.2	-0.39	+0.016	-0.2	-1.4	97	59	80
CV3	0.50	6.2	-0.37	+0.006	+0.9	-1.4	97	73	69
CV4	0.50	6.3	-0.88	+0.003	+1.6	-0.4	99	82	65
CV5	0.50	6.4	-0.22	+0.018	+0.9	-1.0	98	71	76
CV6	0.50	6.5	-0.99	+0.018	+2.0	-1.2	98	64	74
CV7	0.50	6.1	-0.49	------	+2.1	-0.4	99	67	70
CV8	0.50	6.2	-0.19	-0.002	0.0	-1.4	97	71	72
CV9	0.50	6.4	-0.40	+0.011	+0.2	-1.2	98	70	75
CV10	0.50	6.5	-0.38	+0.021	+2.0	-1.4	97	64	74
CV11	0.50	6.6	-0.26	+0.015	-3.0	-1.7	97	66	76

* Eau/(ciment + cendres volantes) en poids.

** Cette valeur est un pourcentage de la résistance d'éprouvettes prismatiques du même mélange qui ont subi une cure en atmosphère humide pendant une période équivalente à la conduite de 500 cycles de gel et de dégel.

FIGURES

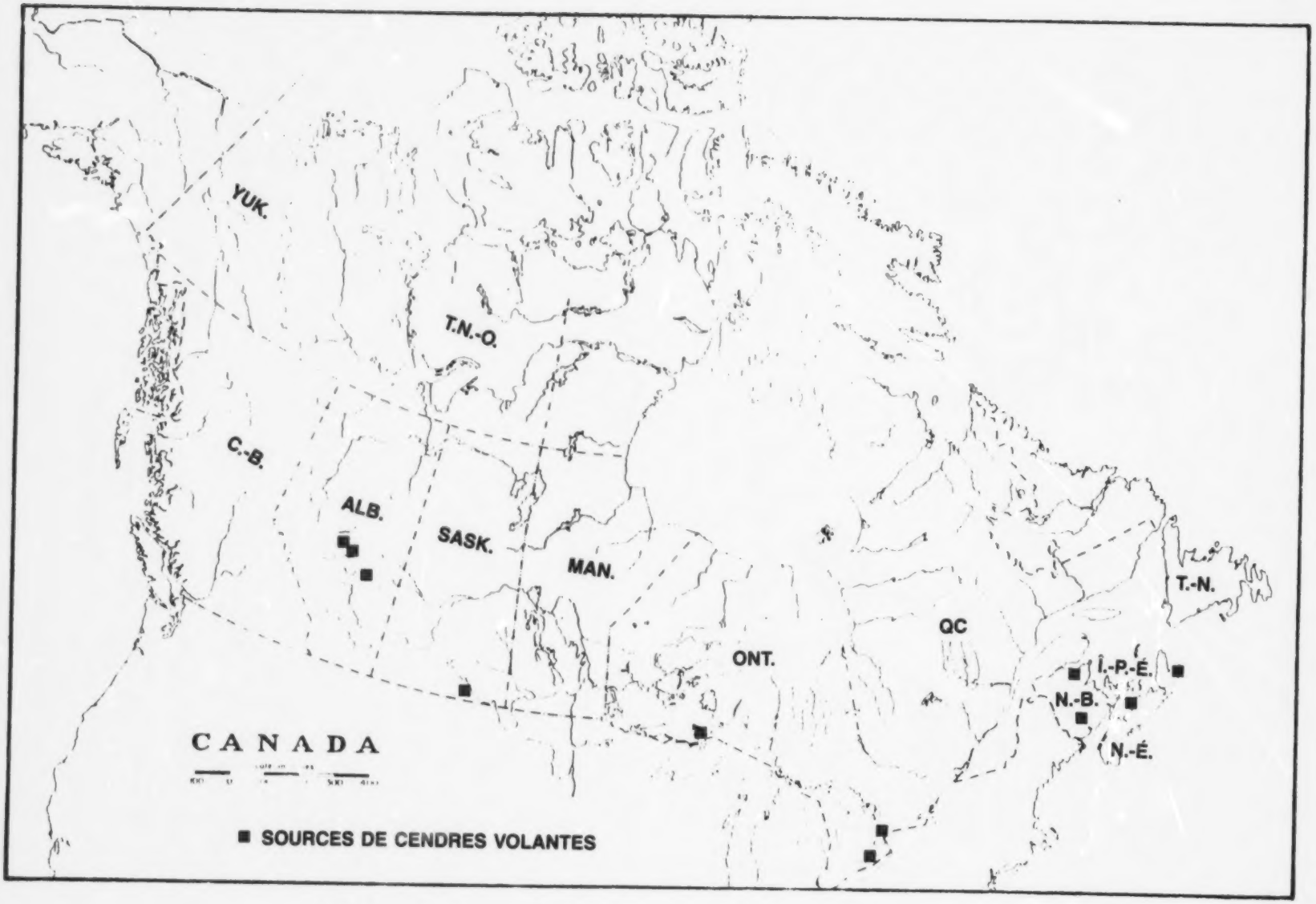


Fig. 1 - Emplacements des sources de cendres volantes

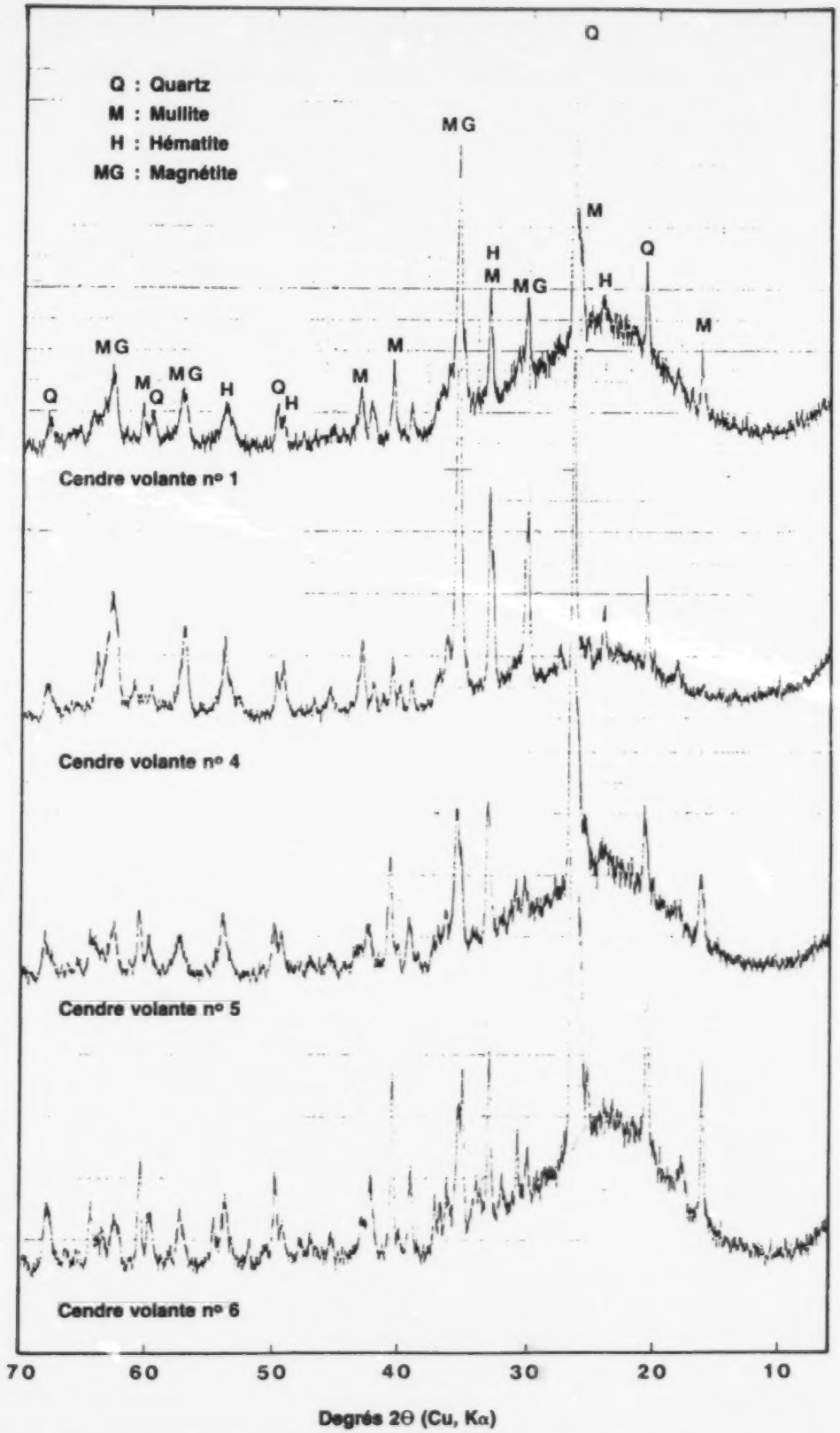


Fig. 2 - Diffractogrammes des cendres volantes bitumineuses

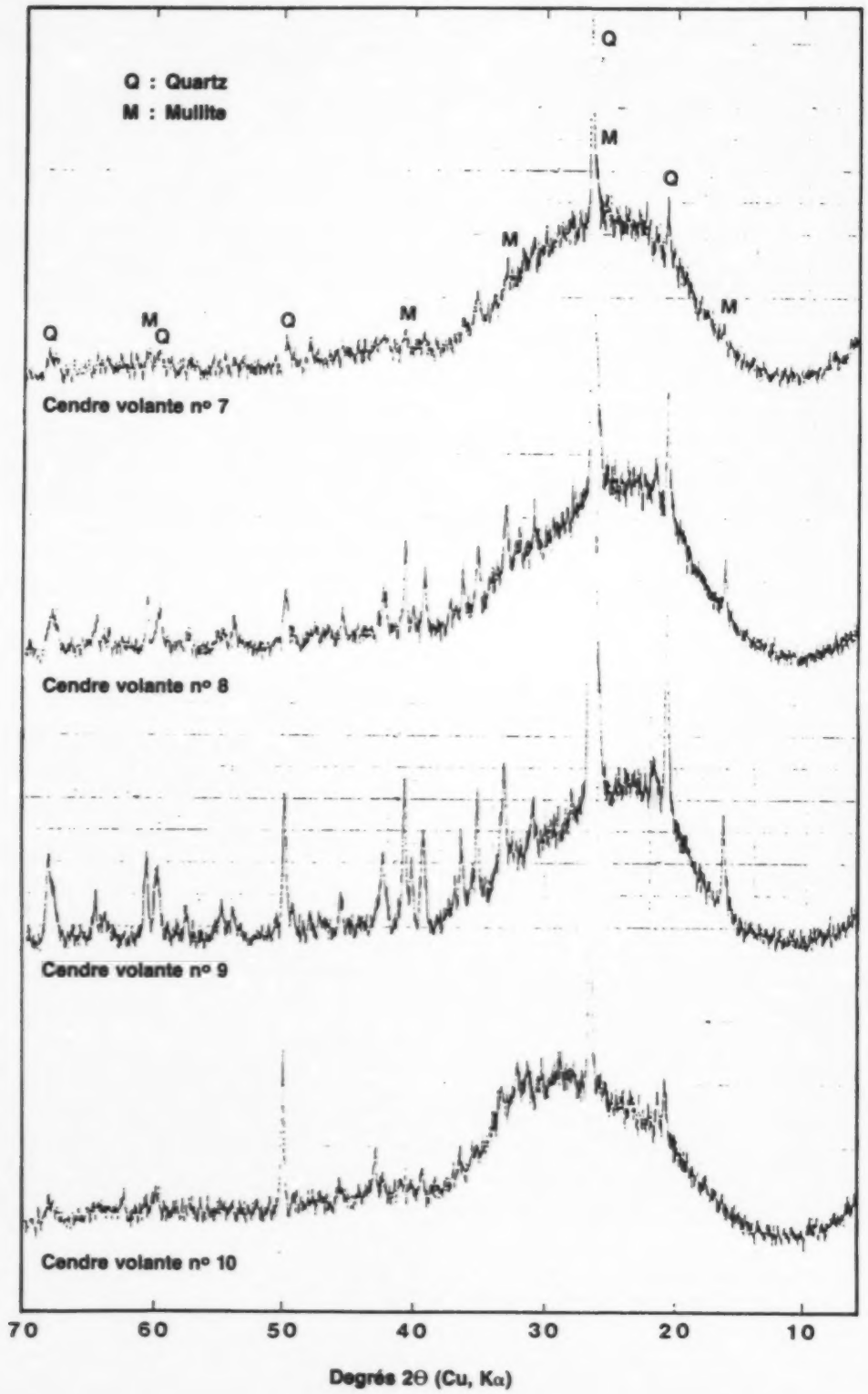
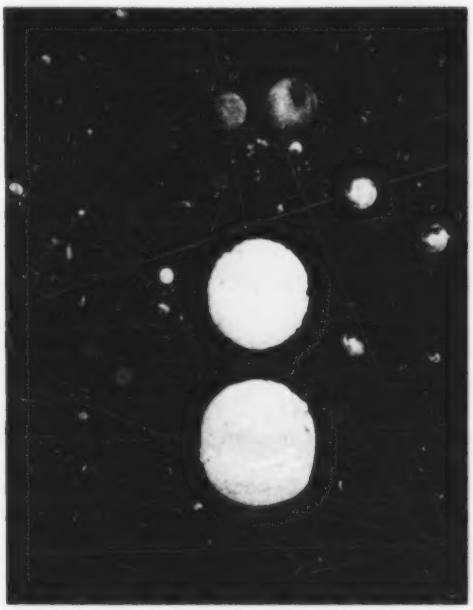
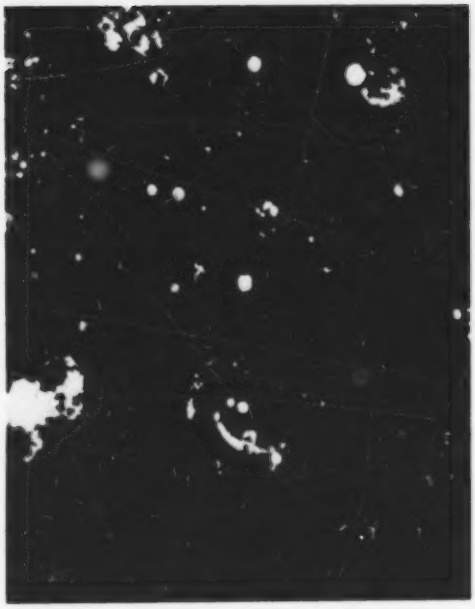


Fig. 3 - Diffractogrammes des cendres volantes subbitumineuses et de lignite

Cendre bitumineuse (n° 1)



Cendre bitumineuse (n° 6)



Cendre subbitumineuse (n° 7)

Cendre de lignite (n° 10)

Fig. 4a) - Images obtenues par microscopie SEM de certaines cendres volantes. (Images produites par électrons rétrodiffusés de sections polies d'échantillons de dispersion.)

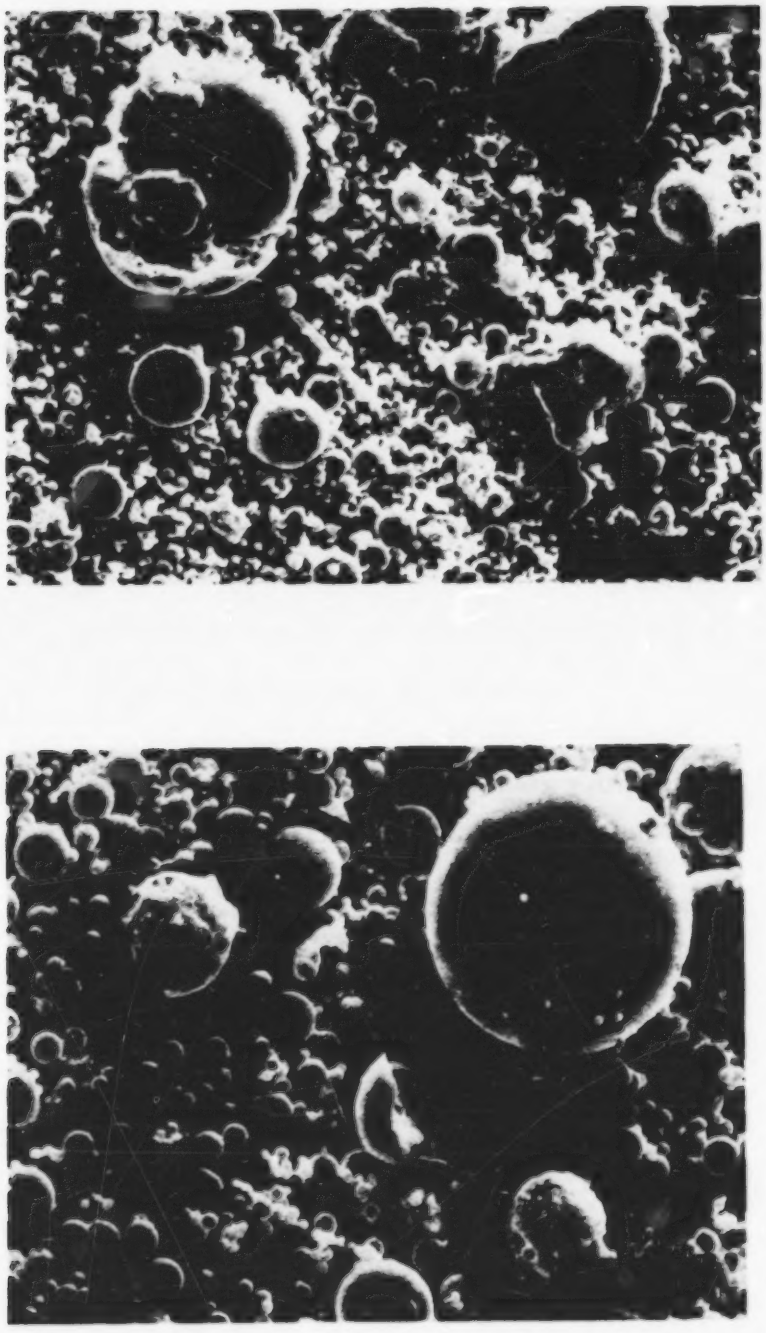


Fig. 4b) - Images obtenues par microscopie SEM à électrons secondaires de particules de cendre volante (cendre bitumineuse n° 1)

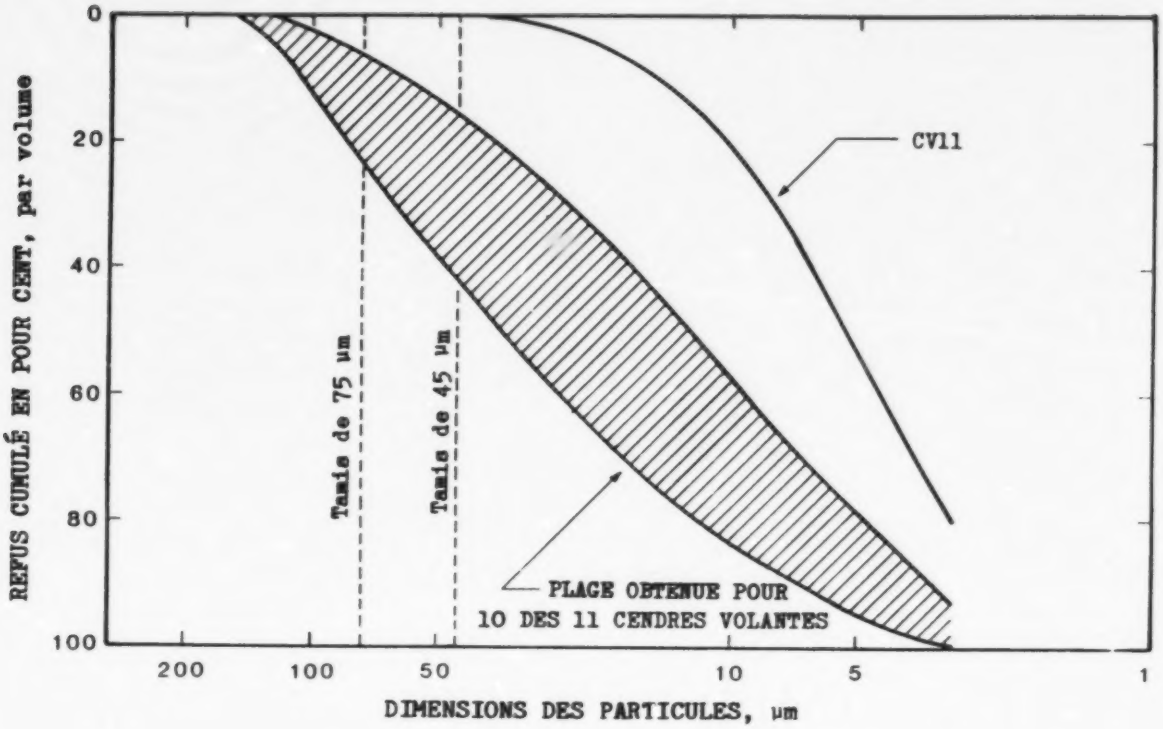


Fig. 5 - Étendue granulométrique des cendres volantes (méthode à laser)

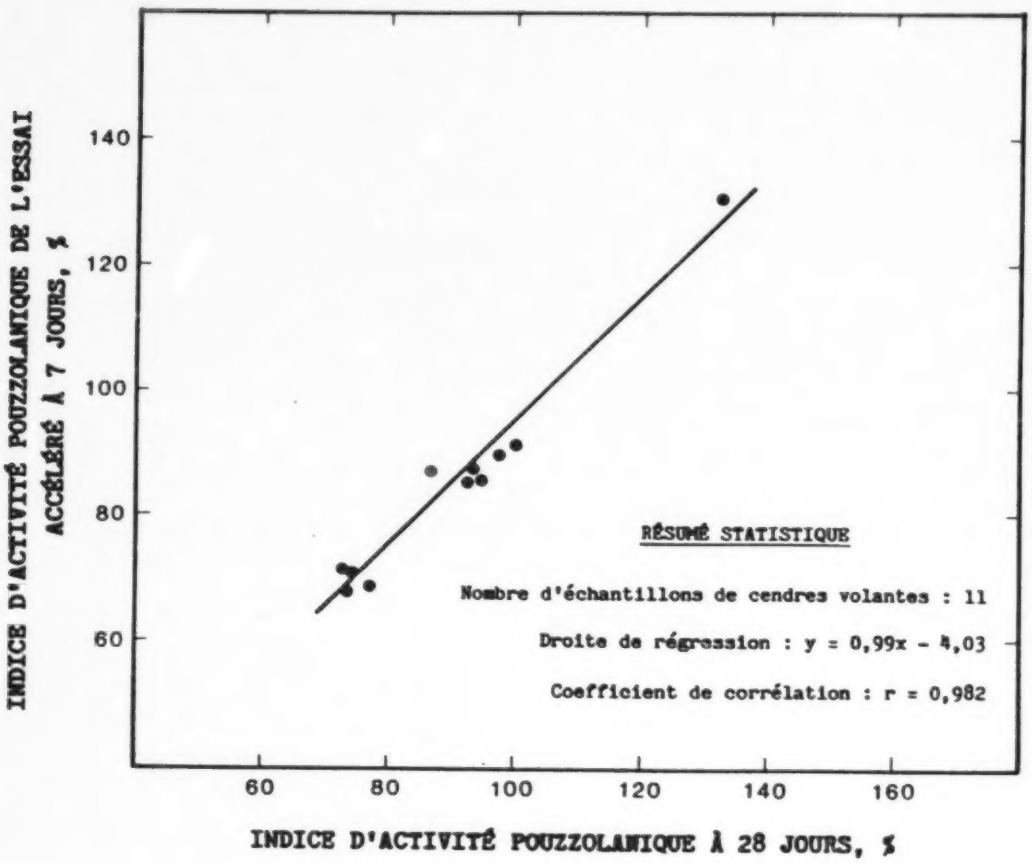


Fig. 6 - Relation entre l'indice d'activité pouzzolanique de l'essai accéléré de 7 jours et celui de l'essai de 28 jours

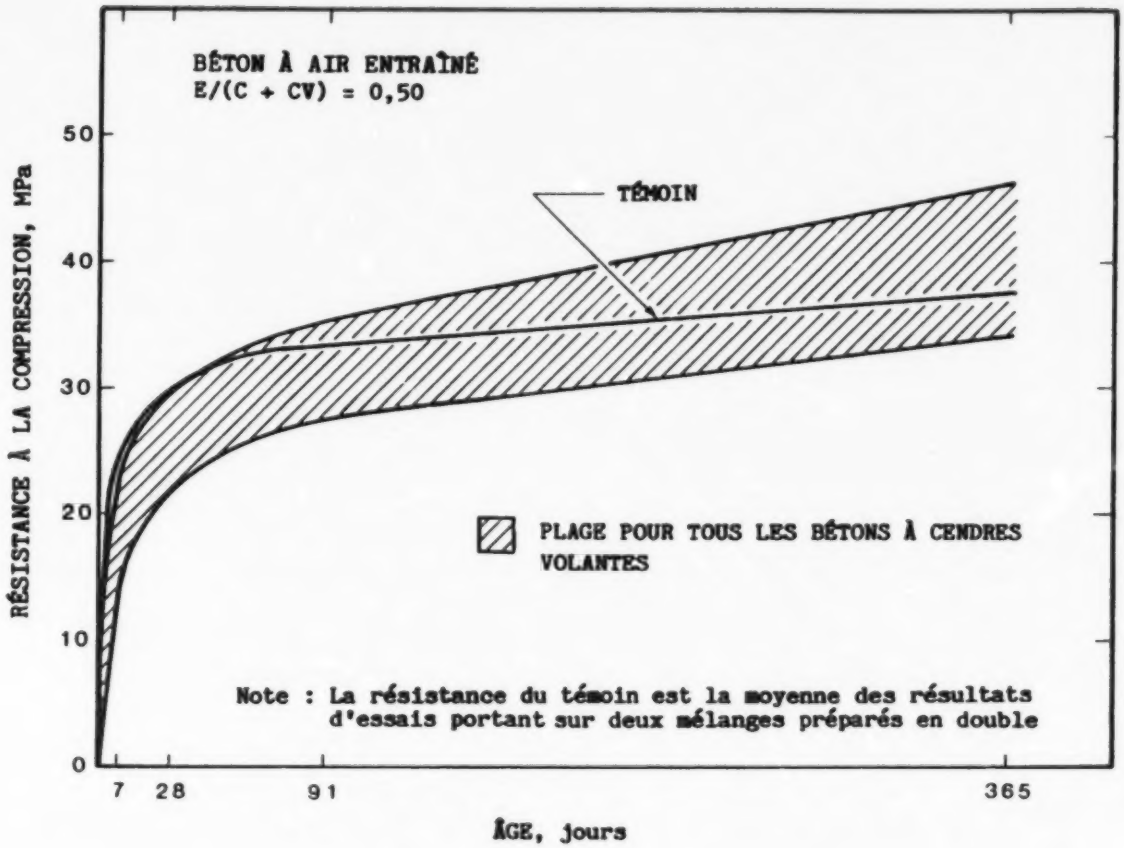


Fig. 7 - Développement de la résistance à la compression avec l'âge

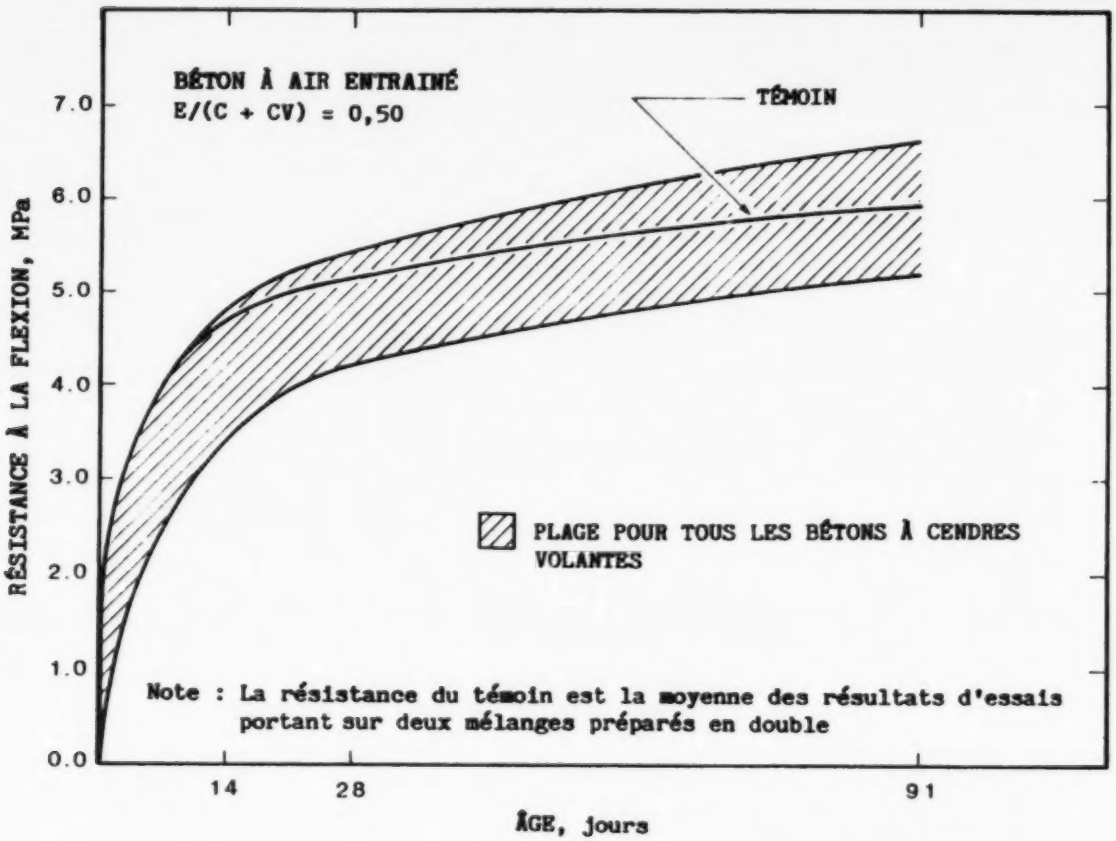


Fig. 8 - Développement de la résistance à la flexion avec l'âge

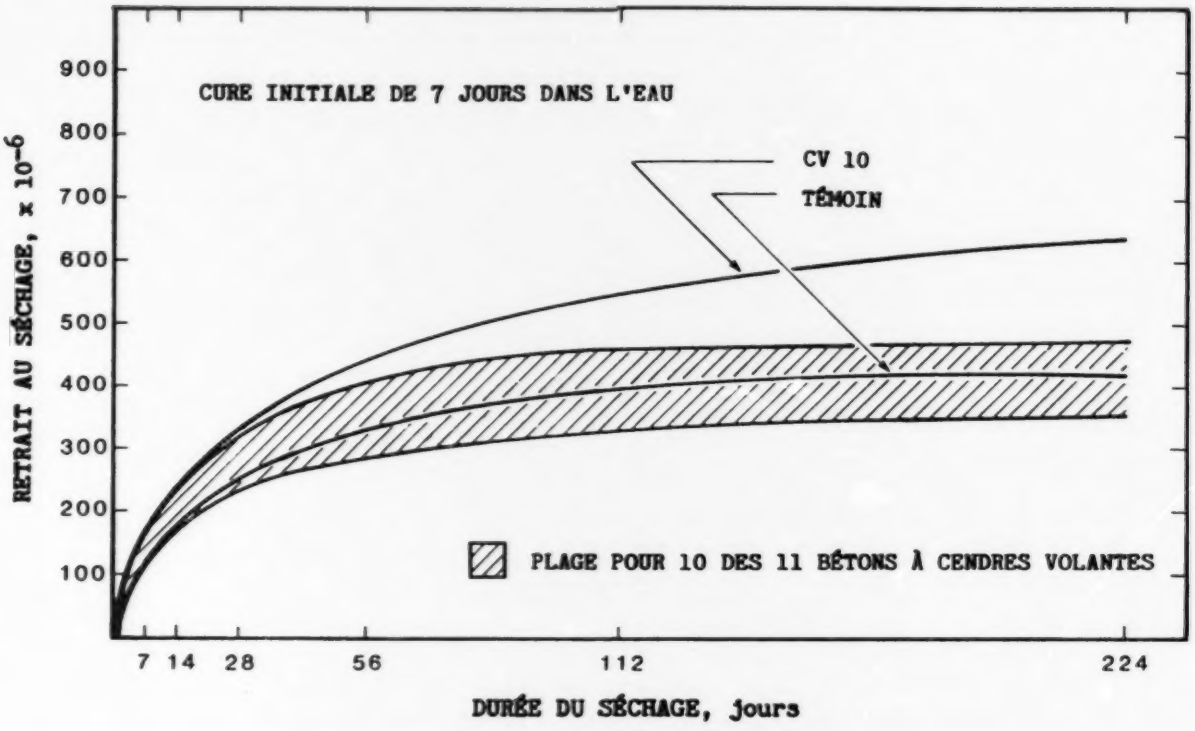


Fig. 9 - Retrait au séchage après une cure initiale de 7 jours dans l'eau

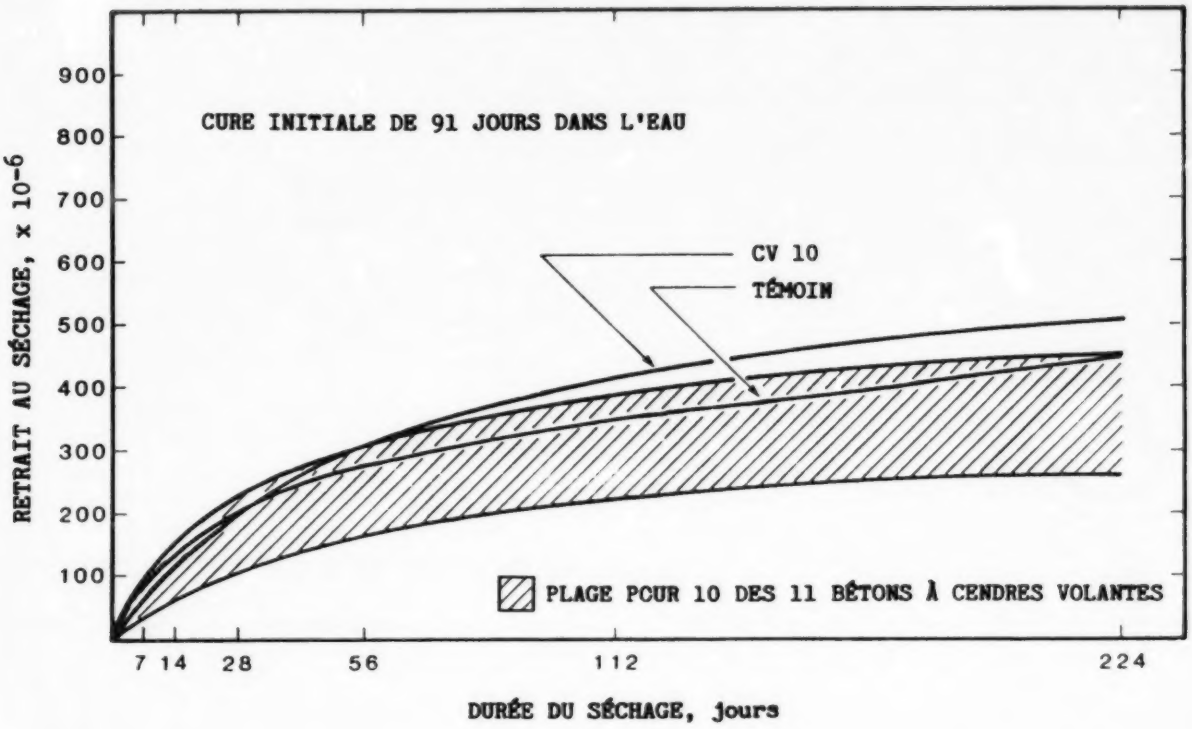


Fig. 10 - Retrait au séchage après une cure initiale de 91 jours dans l'eau

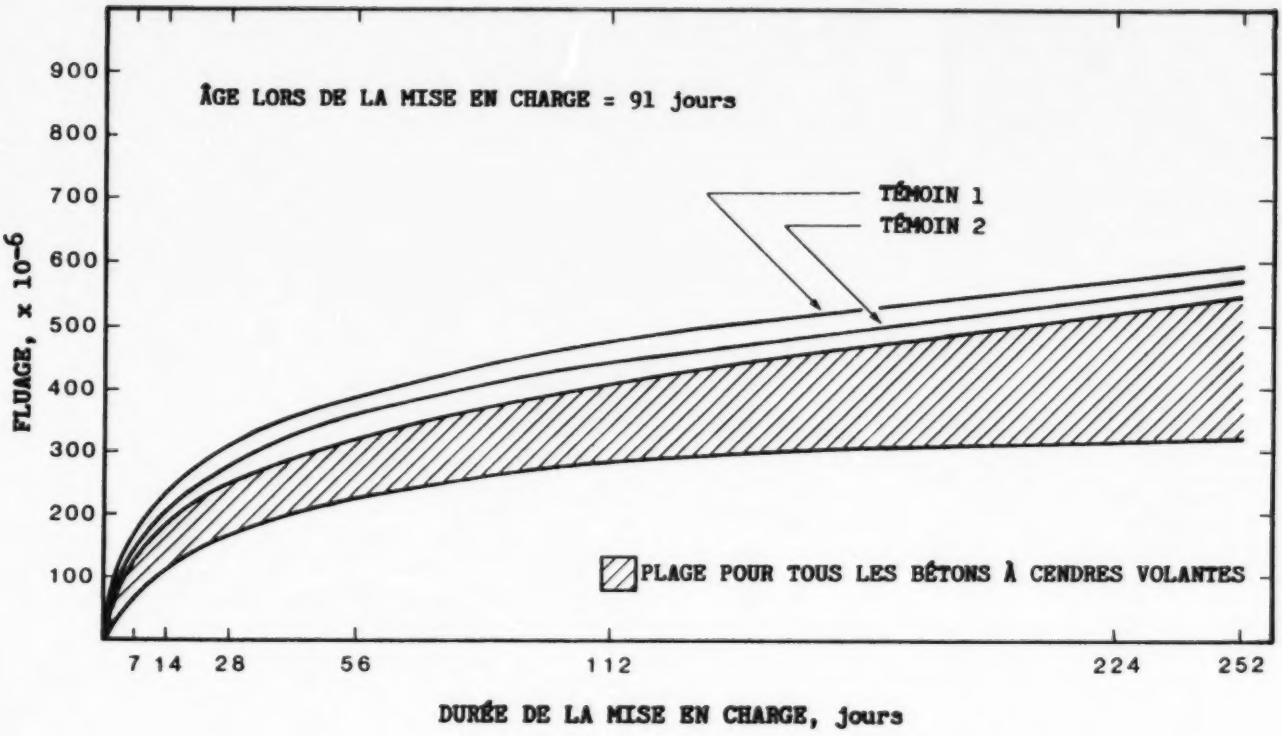


Fig. 11 - Fluage après une cure initiale de 91 jours en atmosphère humide

ANNEXE A

RÉSULTATS DÉTAILLÉS DES ESSAIS DE GEL ET DE DÉGEL

Tableau A1 - Variations de poids de prismes de référence conservés en atmosphère humide et de prismes d'essai soumis à des cycles de gel et de dégel

Mélange n°	E/(C+CV)*	Teneur en air, %	Poids des prismes de 76 x 102 x 390 mm, kg							Variation relative, %
			Prismes de référence conservés en atmosphère humide			Prismes d'essai soumis à des cycles de gel et de dégel				
			À 14 jours	À la fin des cycles, **	Variation, %	À 0 cycle	À 300 cycles	À 500 cycles	Variation, % (après 500 cycles)	
Témoin 1	0.50	6,5	7.186	7.202	+0.22	7.228	7.213	7.196	-0.44	-0.66
Témoin 2	0.50	6.4	7.125	7.159	+0.48	7.129	7.130	7.133	+0.06	-0.42
CV1	0.50	6.2	6.970	7.010	+0.57	7.024	7.051	7.028	+0.06	-0.51
CV2	0.50	6.2	7.124	7.147	+0.32	7.174	7.167	7.146	-0.39	-0.71
CV3	0.50	6.2	7.088	7.112	+0.34	7.023	7.011	6.997	-0.37	-0.71
CV4	0.50	6.3	7.147	7.164	+0.24	7.173	7.142	7.110	-0.88	-1.12
CV5	0.50	6.4	7.067	7.109	+0.59	7.127	7.128	7.111	-0.22	-0.81
CV6	0.50	6.5	7.077	7.113	+0.51	7.099	7.083	7.029	-0.99	-1.50
CV7	0.50	6.1	7.052	7.087	+0.50	6.988	6.972	6.954	-0.49	-0.99
CV8	0.50	6.2	7.024	7.045	+0.30	6.973	6.983	6.960	-0.19	-0.49
CV9	0.50	6.4	7.034	7.064	+0.43	6.993	6.993	6.965	-0.40	-0.83
CV10	0.50	6.5	7.017	7.041	+0.34	7.032	7.035	7.005	-0.38	-0.72
CV11	0.50	6.6	7.282	7.306	+0.26	7.183	7.187	7.164	-0.26	-0.52

* Eau/(ciment + cendres volantes) en poids.

** Correspondant à l'équivalent de 500 cycles, c.-à-d. à environ 90 jours.

Tableau A2 - Variations de longueur de prismes de référence conservés en atmosphère humide et de prismes d'essai soumis à des cycles de gel et de dégel

Mélange n°	E/(C+CV)*	Teneur en air, %	Longueur efficace des prismes de 76 x 102 x 390 mm, ** mm							Variation relative, †† %
			Prismes de référence conservés en atmosphère humide			Prismes d'essai soumis à des cycles de gel et de dégel				
			À 14 jours	À la fin des cycles,†	Variation, †† %	À 0 cycle	À 300 cycles	À 500 cycles	Variation, †† % (après 500 cycles)	
Témoin 1	0.50	6.5	3.216	3.213	-0.001	3.419	3.432	3.444	+0.007	+0.008
Témoin 2	0.50	6.4	3.513	3.594	+0.022	-----	-----	-----	------	------
CV1	0.50	6.2	3.404	3.439	+0.010	3.556	3.528	3.576	+0.006	-0.004
CV2	0.50	6.2	3.373	3.421	+0.013	3.279	3.312	3.338	+0.016	+0.003
CV3	0.50	6.2	2.865	2.891	+0.007	3.073	3.089	3.096	+0.006	-0.001
CV4	0.50	6.3	3.112	3.127	+0.004	3.487	3.515	3.498	+0.003	-0.001
CV5	0.50	6.4	2.720	2.758	+0.010	3.241	3.261	3.307	+0.018	+0.008
CV6	0.50	6.5	3.510	3.554	+0.012	3.675	3.716	3.741	+0.018	+0.006
CV7	0.50	6.1	3.762	3.792	+0.008	-----	-----	-----	------	------
CV8	0.50	6.2	3.444	3.475	+0.009	3.287	3.289	3.281	-0.002	-0.011
CV9	0.50	6.4	3.487	3.548	+0.017	3.559	3.559	3.597	+0.011	-0.006
CV10	0.50	6.5	3.294	3.330	+0.010	3.439	3.461	3.514	+0.021	+0.011
CV11	0.50	6.6	3.096	3.122	+0.007	3.470	3.485	3.526	+0.015	+0.008

* Eau/(ciment + cendres volantes) en poids.

** Longueur entre repères = 358 mm.

† Correspondant à l'équivalent de 500 cycles, c.-à-d. à environ 90 jours.

†† Pourcentage de la longueur efficace totale incluant la longueur entre repères de 358 mm.

Tableau A3 - Variations de vitesse d'impulsion ultrasonique de prismes de référence conservés en atmosphère humide et de prismes d'essai soumis à des cycles de gel et de dégel

Mélange n°	E/(C+CV)*	Teneur en air, %	Vitesse d'impulsion ultrasonique des prismes de 76 x 102 x 390 mm, m/s							Variation relative, %
			Prismes de référence conservés en atmosphère humide			Prismes d'essai soumis à des cycles de gel et de dégel				
			À 14 jours	À la fin des cycles, **	Variation, %	À 0 cycle	À 300 cycles	À 500 cycles	Variation, % (après 500 cycles)	
Témoin 1	0.50	6.5	4670	4850	+3.8	4690	4670	4690	0.0	-3.8
Témoin 2	0.50	6.4	4550	4760	+4.6	4520	4560	4590	+1.5	-3.1
CV1	0.50	6.2	4340	4670	+7.6	4310	4380	4430	+2.8	-8.8
CV2	0.50	6.2	4500	4780	+6.2	4530	4520	4520	-0.2	-6.4
CV3	0.50	6.2	4470	4720	+5.6	4430	4460	4470	+0.9	-4.7
CV4	0.50	6.3	4460	4760	+6.7	4460	4510	4530	+1.6	-5.1
CV5	0.50	6.4	4380	4720	+7.8	4470	4480	4510	+0.9	-6.9
CV6	0.50	6.5	4390	4690	+6.8	4440	4480	4530	+2.0	-4.8
CV7	0.50	6.1	4380	4650	+6.2	4330	4390	4420	+2.1	-4.1
CV8	0.50	6.2	4460	4720	+5.8	4480	4520	4480	0.0	-5.8
CV9	0.50	6.4	4410	4670	+5.9	4470	4490	4480	+0.2	-5.7
CV10	0.50	6.5	4510	4750	+5.3	4500	4460	4590	+2.0	-3.3
CV11	0.50	6.6	4650	4780	+2.8	4640	4580	4500	-3.0	-5.8

* Eau/(ciment + cendres volantes) en poids.

** Correspondant à l'équivalent de 500 cycles, c.-à-d. à environ 90 jours.

Tableau A4 - Variations de fréquence longitudinale fondamentale de prismes de référence conservés en atmosphère humide et de prismes d'essai soumis à des cycles de gel et de dégel

Mélange n°	E/(C+CV)*	Teneur en air, %	Fréquence longitudinale fondamentale des prismes de 76 x 102 x 390 mm, Hz						Variation relative, %
			Prismes de référence conservés en atmosphère humide			Prismes d'essai soumis à des cycles de gel et de dégel			
			À 14 jours	À la fin des cycles, **	Variation, %	À 0 cycle	À 300 cycles	À 500 cycles	Variation, % (après 500 cycles)
Témoin 1	0.50	6.5	5250	5470	+4.2	5290	5230	5240	-0.9	-5.1
Témoin 2	0.50	6.4	5120	5350	+4.5	5120	5070	5100	-0.4	-4.9
CV1	0.50	6.2	4910	5290	+7.7	4980	4890	4910	-1.4	-9.1
CV2	0.50	6.2	5030	5400	+7.4	5050	5020	4980	-1.4	-8.8
CV3	0.50	6.2	4970	5320	+7.0	4990	4910	4920	-1.4	-8.4
CV4	0.50	6.3	5060	5350	+5.7	5040	5010	5020	-0.4	-6.1
CV5	0.50	6.4	4960	5360	+8.1	5050	4980	5000	-1.0	-9.1
CV6	0.50	6.5	5000	5340	+6.8	5030	4950	4970	-1.2	-8.0
CV7	0.50	6.1	4940	5270	+6.7	4920	4860	4900	-0.4	-7.1
CV8	0.50	6.2	5100	5370	+5.3	5100	5020	5030	-1.4	-6.7
CV9	0.50	6.4	4990	5320	+6.6	5020	4960	4960	-1.2	-7.8
CV10	0.50	6.5	5090	5360	+5.3	5020	4950	4950	-1.4	-6.7
CV11	0.50	6.6	5240	5430	+3.6	5200	5090	5110	-1.7	-5.3

* Eau/(ciment + cendres volantes) en poids.

** Correspondant à l'équivalent de 500 cycles, c.-à-d. à environ 90 jours.